

* NOTICES *

Japan Patent Office is not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. **** shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

CLAIMS

[Claim(s)]

[Claim 1] It is magnetization distribution calculation equipment which computes the magnetization distribution in this magnetic material when impressing and magnetizing a field to a magnetic material with a magnetization vessel. It has a magnetization current wave form count means to compute the current wave form where it flows in said magnetization vessel. This magnetization current wave form count means A calculation means to compute the parameter corresponding to the system containing said magnetization machine and this magnetic material based on a setting means to set up the parameter of the proper of said magnetization machine, said set-up parameter of a proper, and the property of said magnetic material, It has a count means to calculate the current wave form where it flows in a magnetization vessel based on the parameter of said proper, and the parameter corresponding to a system. Transient analysis of the impression field at the time of impressing the field generated according to the current wave form which divided said magnetic material into the element of a finite individual, and was computed by said magnetization current wave form count means to each element which has not been magnetized is performed. Magnetization distribution calculation equipment characterized by having further a first magnetization process count means to extract the maximum field for every element and to compute the point magnetized [maximum] for every element based on this maximum field and the property of said magnetic material.

[Claim 2] Magnetization distribution calculation equipment according to claim 1 characterized by having further a residual magnetization count means to compute the residual magnetization of each element based on the point of each element computed by said first magnetization process count means magnetized [maximum], and the property of said magnetic material.

[Claim 3] Magnetization distribution calculation equipment according to claim 2 characterized by having further a demagnetization process count means to compute magnetization of each of said element when the field which magnetization of each of this element generates is impressed to each element which has the residual magnetization and this residual magnetization of each element computed by said residual magnetization count means.

[Claim 4] Magnetization distribution calculation equipment according to claim 1 to 3 characterized by having further a full magnetization curvilinear presumption means to compute the magnetization curve at the time of impressing a high field among the magnetization curves which show the condition of the magnetization at the time of impressing and magnetizing a field to said magnetic material based on the property of this magnetic material, and computing magnetization distribution using this magnetization curve.

[Claim 5] Magnetization distribution calculation equipment according to claim 1 characterized by managing independently the parameter of the proper of said magnetization machine, and the parameter which shows the property of said magnetic material.

[Claim 6]

THIS PAGE BLANK (USPTO)

* NOTICES *

Japan Patent Office is not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.**** shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

DETAILED DESCRIPTION

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Field of the Invention] This invention relates to the equipment which searches for the magnetization distribution at the time of magnetizing by impressing a field to the magnetic substance by numerical calculation.

[0002]

[Description of the Prior Art] recent years, magnetic recording, and electromagnetism -- many attempts which carry out simulation of the magnetic hysteresis phenomenon by numerical analysis for the design of a device called an actuator are examined. There is the VMSW method as one of the approaches of searching for the magnetization distribution in a magnet at the time especially of thus, magnetizing by applying a strong field to a hard magnetic material.

[0003] This approach is the technique of having added the hand so that a radical may be set to the technique of expressing a hysteresis characteristic as a set of the S-W model (model of Stoner and Wohlfarth) showing an uniaxial anisotropy crystal grain child's magnetization rotation behavior and each magnetization might be made adjustable. "The concrete contents of this technique, the verification by the new static magnetic field analysis method of the Mori:anisotropy ingredient, and magnetization vector measurement, The Institute of Electrical Engineers of Japan study group data, study group [rotating-machine / a quiescence machine and] SA-91-6, RM-91-15, and pp 51-60 (1991)", And "Mori: It is indicated by the new static magnetic field analysis method II and the new Institute of Electrical Engineers of Japan study group data of an anisotropy ingredient, study group SA-91-25, RM-91-88, and pp97-106(1991)" [a quiescence machine and / rotating-machine], and magnetization of a permanent magnet and analysis of a demagnetization process are performed in it.

[0004] moreover, others -- "M. -- Enokizono et al.:Magnetic Field Analysis of Anisotropic Permanent Magnet Problems by Finite ElementMethod, IEEE Trans. Magn., MAG-33, No.2, and pp 1612-1615 (1997)", "the field analysis about the Enozono and Tsuzaki:anisotropy permanent magnet problem, Institute of Electrical Engineers of Japan study group data MAGUNE tex study group MAG-96-251, pp 21-30 (1996)" -- VMSW -- the result of having performed magnetic magnetization and count of a demagnetization process using law is reported.

[0005] However, any above-mentioned technique, In searching for magnetization distribution, the field analysis solver (equipment) of dedication using the VMSW method newly needed to be developed, and the load was large. Moreover, the magnetization current wave form was required as input data, therefore measurement was required beforehand.

[0006]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] It was made in order that this invention might solve the above-mentioned technical problem, and it aims at offering the possible magnetization distribution calculation processor which can search for the magnetization current wave form of a magnetization machine required for calculation of magnetization distribution of a magnet by count, and computes magnetization distribution of a magnet using the existing general-purpose field count solver.

[0007]

[Means for Solving the Problem] In order to solve the above-mentioned technical problem, the magnetization distribution calculation processor of this invention is equipped with the following configurations. Namely, the time of impressing and magnetizing a field to a magnetic material with a magnetization vessel,

THIS PAGE BLANK (USPTO)

* NOTICES *

Japan Patent Office is not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.**** shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

TECHNICAL FIELD

[Field of the Invention] This invention relates to the equipment which searches for the magnetization distribution at the time of magnetizing by impressing a field to the magnetic substance by numerical calculation.

[Translation done.]

THIS PAGE BLANK (USPTO)

* NOTICES *

Japan Patent Office is not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. **** shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

PRIOR ART

[Description of the Prior Art] recent years, magnetic recording, and electromagnetism -- many attempts which carry out simulation of the magnetic hysteresis phenomenon by numerical analysis for the design of a device called an actuator are examined. There is the VMSW method as one of the approaches of searching for the magnetization distribution in a magnet at the time especially of thus, magnetizing by applying a strong field to a hard magnetic material.

[0003] This approach is the technique of having added the hand so that a radical may be set to the technique of expressing a hysteresis characteristic as a set of the S-W model (model of Stoner and Wohlfarth) showing an uniaxial anisotropy crystal grain child's magnetization rotation behavior and each magnetization might be made adjustable. "The concrete contents of this technique, the verification by the new static magnetic field analysis method of the Mori:anisotropy ingredient, and magnetization vector measurement, The Institute of Electrical Engineers of Japan study group data, study group [rotating-machine / a quiescence machine and] SA-91-6, RM-91-15, and pp 51-60 (1991)", And "Mori: It is indicated by the new static magnetic field analysis method II and the new Institute of Electrical Engineers of Japan study group data of an anisotropy ingredient, study group SA-91-25, RM-91-88, and pp97-106(1991)" [a quiescence machine and / rotating-machine]. In it, magnetization of a permanent magnet and analysis of a demagnetization process are performed.

[0004] moreover, others -- "M. -- Enokizono et al.:Magnetic Field Analysis of Anisotropic Permanent Magnet Problems by Finite ElementMethod, IEEE Trans. Magn., MAG-33, No.2, and pp 1612-1615 (1997)", "the field analysis about the Enokizono and Tsuzaki:anisotropy permanent magnet problem, Institute of Electrical Engineers of Japan study group data MAGUNE tex study group MAG-96-251, pp 21-30 (1996)" -- VMSW -- law The result of having used and having performed magnetic magnetization and count of a demagnetization process is reported.

[0005] However, any above-mentioned technique, In searching for magnetization distribution, the field analysis solver (equipment) of dedication using the VMSW method newly needed to be developed, and the load was large. Moreover, the magnetization current wave form was required as input data, therefore measurement was required beforehand.

[Translation done.]

THIS PAGE BLANK (USPTO)

* NOTICES *

Japan Patent Office is not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.**** shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

EFFECT OF THE INVENTION

[Effect of the Invention] According to this invention, as explained above, the magnetization current wave form of a magnetization machine required for calculation of magnetization distribution of a magnet can be searched for by count, and using the existing general-purpose field count solver, magnetization distribution of a magnet is computed and it becomes possible.

[Translation done.]

THIS PAGE BLANK (USPTO)

* NOTICES *

Japan Patent Office is not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. **** shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

TECHNICAL PROBLEM

[Problem(s) to be Solved by the Invention] It was made in order that this invention might solve the above-mentioned technical problem, and it aims at offering the possible magnetization distribution calculation processor which can search for the magnetization current wave form of a magnetization machine required for calculation of magnetization distribution of a magnet by count, and computes magnetization distribution of a magnet using the existing general-purpose field count solver.

[Translation done.]

THIS PAGE BLANK (USPTO)

* NOTICES *

Japan Patent Office is not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. **** shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

MEANS

[Means for Solving the Problem] In order to solve the above-mentioned technical problem, the magnetization distribution calculation processor of this invention is equipped with the following configurations. Namely, the time of impressing and magnetizing a field to a magnetic material with a magnetization vessel, It has a magnetization current wave form count means to compute the current wave form where are magnetization distribution calculation equipment which computes the magnetization distribution in this magnetic material, and it flows in said magnetization vessel. This magnetization current wave form count means A calculation means to compute the parameter corresponding to the system containing said magnetization machine and this magnetic material based on a setting means to set up the parameter of the proper of said magnetization machine, said set-up parameter of a proper, and the property of said magnetic material, It has a count means to calculate the current wave form where it flows in a magnetization vessel based on the parameter of said proper, and the parameter corresponding to a system. Transient analysis of the impression field at the time of impressing the field generated according to the current wave form which divided said magnetic material into the element of a finite individual, and was computed by said magnetization current wave form count means to each element which has not been magnetized is performed. The maximum field for every element is extracted and it has further a first magnetization process count means to compute the point magnetized [maximum] for every element based on this maximum field and the property of said magnetic material.

[0008]

[Embodiment of the Invention] Hereafter, with reference to an attached drawing, 1 suitable operation gestalt of this invention is explained to a detail.

[0009]

[Operation gestalt 1]

THIS PAGE BLANK (USPTO)

* NOTICES *

Japan Patent Office is not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.**** shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

DESCRIPTION OF DRAWINGS

[Brief Description of the Drawings]

[Drawing 1] It is the block diagram showing the configuration of the magnetization distribution calculation equipment concerning the operation gestalt 1 of this invention.

[Drawing 2] It is the circuit diagram undone in the magnetization current wave form count section of the magnetization distribution calculation equipment concerning the operation gestalt 1 of this invention.

[Drawing 3] It is drawing showing the processing flow which the magnetization current wave form count section of the magnetization distribution calculation equipment concerning the operation gestalt 1 of this invention performs.

[Drawing 4] It is drawing explaining how to ask for saturation magnetization by $1/H_2$ extrapolation in the magnetization current wave form count section of the magnetization distribution calculation equipment concerning the operation gestalt 1 of this invention.

[Drawing 5] It is drawing explaining the reversible magnetization rotation field of a magnetization curve.

[Drawing 6] It is drawing explaining chir.

[Drawing 7] It is drawing showing the processing flow which the perfect magnetization curve presumption section of the magnetization distribution calculation equipment concerning the operation gestalt 1 of this invention performs.

[Drawing 8] It is the explanatory view of the magnetization rotation model explaining the contents of the first magnetization process count section of the magnetization distribution calculation equipment concerning the operation gestalt 1 of this invention.

[Drawing 9] the processing flow which the first magnetization process count section of the magnetization distribution calculation equipment concerning the operation gestalt 1 of this invention performs is shown -- it comes out.

[Drawing 10] It is drawing explaining the count approach of the residual magnetization of the magnetization distribution calculation equipment concerning the operation gestalt 1 of this invention.

[Drawing 11] It is drawing showing the processing flow which the residual magnetization count section of the magnetization distribution calculation equipment concerning the operation gestalt 1 of this invention performs.

[Drawing 12] It is drawing explaining the demagnetization process of an anisotropic magnet.

[Drawing 13] It is drawing explaining chirec.

THIS PAGE BLANK (USPTO)

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-328957

(43)Date of publication of application : 15.11.2002

(51)Int.Cl.

G06F 17/50
H01F 41/00

(21)Application number : 2001-133502

(71)Applicant : CANON INC

(22)Date of filing : 27.04.2001

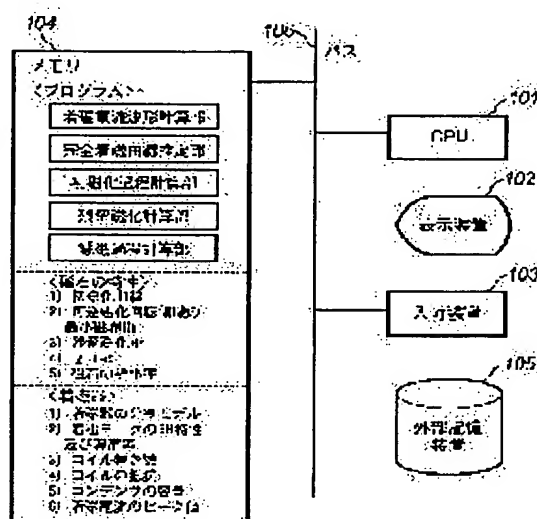
(72)Inventor : SASAKI TOYONARI
YONEDA HIROSHI

(54) MAGNETIZING DISTRIBUTION CALCULATION DEVICE AND CALCULATION METHOD

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To find a magnetic current waveform of a magnetic instrument by calculation and calculate magnetizing distribution of a magnet using a multipurpose magnetic field calculation device.

SOLUTION: This is a magnetizing distribution calculation system which calculates magnetizing distribution when a magnet material is magnetized by the magnetic instrument. A calculation means, which calculates the current waveform of the magnetic instrument, is prepared. The calculation means has a means, which sets a unique parameter of the magnetic instrument, a means which calculates a parameter corresponding to series including the magnetic instrument and the magnetic material according to the set unique parameter and characteristic of the magnetic material, and a means which calculates the current waveform according to the unique parameter and the parameter corresponding to the series. It also has a calculation means for initial magnetizing process, which processes transient analysis of the impressed magnetic field when the magnetic field generated by the calculated current waveform is impressed, and calculates the maximum magnetizing point by each element.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

THIS PAGE BLANK (USPTO)

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-328957

(P2002-328957A)

(43) 公開日 平成14年11月15日 (2002. 11. 15)

(51) Int.Cl.⁷

G 0 6 F 17/50

H 0 1 F 41/00

識別記号

6 1 2

F I

G 0 6 F 17/50

H 0 1 F 41/00

テームコード* (参考)

6 1 2 H 5 B 0 4 6

6 1 2 C

D

審査請求 未請求 請求項の数36 O L (全 23 頁)

(21) 出願番号 特願2001-133502(P2001-133502)

(22) 出願日 平成13年4月27日 (2001. 4. 27)

(71) 出願人 000001007

キヤノン株式会社

東京都大田区下丸子3丁目30番2号

(72) 発明者 佐々木 豊成

東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キヤ

ノン株式会社内

(72) 発明者 米田 弘

東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キヤ

ノン株式会社内

(74) 代理人 100076428

弁理士 大塚 康德 (外3名)

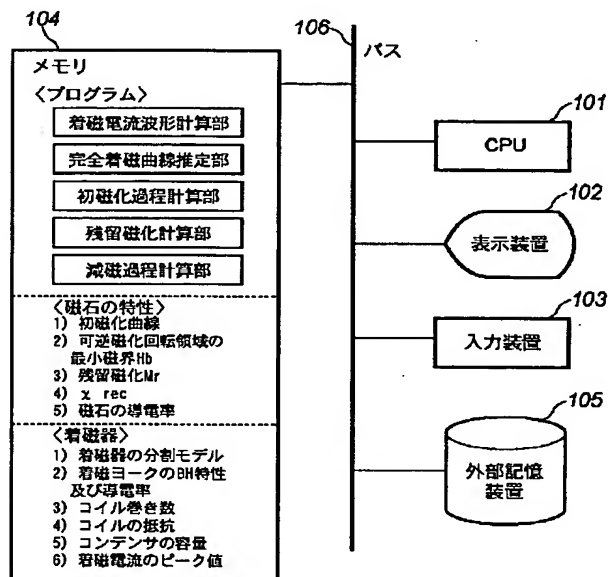
Fターム(参考) 5B046 AA07 DA01 DA02 GA01 JA10

(54) 【発明の名称】 磁化分布算出装置および算出方法

(57) 【要約】

【課題】 着磁器の着磁電流波形を計算によりもとめ、かつ既存の汎用磁界計算装置を用いて磁石の磁化分布を算出する。

【解決手段】 着磁器によって磁性材料に着磁したときの、磁化分布を算出する磁化分布算出装置であって、前記着磁器に流れる電流波形を算出する計算手段を備え、該計算手段は、前記着磁器の固有のパラメータを設定する手段と、前記設定された固有のパラメータと前記磁性材料の特性とに基づいて、前記着磁器と該磁性材料とを含んだ系に対応したパラメータを算出する手段と、前記固有のパラメータと系に対応したパラメータとに基づいて電流波形を計算する手段とを備え、算出された電流波形により発生する磁界を印加した場合の印加磁界の過渡解析を行い、各要素ごとに最大磁化点を算出する初磁化過程計算手段を更に備える。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 着磁器によって磁性材料に磁界を印加し着磁したときの、該磁性材料における磁化分布を算出する磁化分布算出装置であって、前記着磁器に流れる電流波形を算出する着磁電流波形計算手段を備え、

該着磁電流波形計算手段は、前記着磁器の固有のパラメータを設定する設定手段と、前記設定された固有のパラメータと前記磁性材料の特性とに基づいて、前記着磁器と該磁性材料とを含んだ系に対応したパラメータを算出する算出手段と、前記固有のパラメータと系に対応したパラメータとに基づいて着磁器に流れる電流波形を計算する計算手段とを備え、

前記磁性材料を有限個の要素に分割し、磁化していない各要素に対して前記着磁電流波形計算手段により算出された電流波形により発生する磁界を印加した場合の印加磁界の過渡解析を行い、各要素ごとの最大磁界を抽出し、該最大磁界と前記磁性材料の特性とに基づいて各要素ごとに最大磁化点を算出する初磁化過程計算手段を更に備えることを特徴とした磁化分布算出装置。

【請求項 2】 前記初磁化過程計算手段により算出された各要素の最大磁化点と、前記磁性材料の特性とに基づいて各要素の残留磁化を算出する残留磁化計算手段を更に備えることを特徴とする請求項 1 に記載の磁化分布算出装置。

【請求項 3】 前記残留磁化計算手段により算出された各要素の残留磁化と、該残留磁化を有する各要素に、該各要素の磁化が発生する磁界が印加された場合の前記各要素の磁化を算出する減磁過程計算手段を更に備えることを特徴とする請求項 2 に記載の磁化分布算出装置。

【請求項 4】 前記磁性材料に磁界を印加して着磁した場合の磁化の状態を示す磁化曲線のうち、高磁界を印加した場合の磁化曲線を、該磁性材料の特性に基づいて算出する完全着磁曲線推定手段をさらに備え、該磁化曲線を用いて磁化分布を算出することを特徴とする請求項 1 乃至 3 に記載の磁化分布算出装置。

【請求項 5】 前記着磁器の固有のパラメータと、前記磁性材料の特性を示すパラメータとを独立に管理することを特徴とする請求項 1 に記載の磁化分布算出装置。

【請求項 6】 前記電流波形計算手段と、前記完全着磁曲線推定手段と、前記初磁化計算手段と、前記残留磁化計算手段と、前記減磁過程計算手段とは、それぞれ独立に機能させることも、所定の手段を連動して機能させることも可能であることを特徴とする請求項 4 に記載の磁化分布算出装置。

【請求項 7】 前記着磁電流波形計算手段により算出された電流波形を表示する手段を更に備えることを特徴とする請求項 1 に記載の磁化分布算出装置。

【請求項 8】 前記完全着磁曲線推定手段により算出さ

(2)

れた磁化曲線を表示する手段を更に備えることを特徴とする請求項 4 に記載の磁化分布算出装置。

【請求項 9】 前記初磁化過程計算手段により算出された各要素の最大磁化点を表示する手段を更に備えることを特徴とする請求項 1 に記載の磁化分布算出装置。

【請求項 10】 前記残留磁化計算手段により算出された各要素の残留磁化を表示する手段を更に備えることを特徴とする請求項 2 に記載の磁化分布算出装置。

【請求項 11】 前記減磁過程計算手段により算出された各要素の磁化を表示する手段を更に備えることを特徴とする請求項 3 に記載の磁化分布算出装置。

【請求項 12】 前記減磁過程算出手段において各要素の磁化を算出するにあたり前記着磁器より印加される磁界のうち、前記磁性材料単体での該磁性材料近傍の磁界分布を表示する手段を更に備えることを特徴とする請求項 11 に記載の磁化分布算出装置。

【請求項 13】 前記減磁過程算出手段において各要素の磁化を算出するにあたり前記着磁器より印加される磁界に基づいて、前記磁性材料単体での該磁性材料表面の磁束密度を表示する手段を更に備えることを特徴とする請求項 11 に記載の磁化分布算出装置。

【請求項 14】 前記着磁器を有限個の要素に分割した要素分割モデルを自動的に生成する生成手段を更に備えることを特徴とする請求項 1 乃至 13 に記載の磁化分布算出装置。

【請求項 15】 前記生成手段は、前記磁性材料の極数及び径、前記着磁器のコイルの太さおよびスロットあたりのコイルの巻き数とに基づいて生成することを特徴とする請求項 14 に記載の磁化分布算出装置。

【請求項 16】 前記生成手段により生成された要素分割モデルを表示する手段を更に備えることを特徴とする請求項 14 または 15 に記載の磁化分布算出装置。

【請求項 17】 前記生成手段により生成された要素分割モデルを、前記磁性材料と、前記着磁器の着磁ヨークおよびコイルと、空気とに色分けして表示することを特徴とする請求項 16 に記載の磁化分布算出装置。

【請求項 18】 着磁器によって磁性材料に磁界を印加し着磁したときの、該磁性材料における磁化分布を算出する磁化分布算出方法であって、

前記着磁器に流れる電流波形を算出する着磁電流波形計算工程を備え、

該着磁電流波形計算工程は、前記着磁器の固有のパラメータを設定する設定工程と、前記設定された固有のパラメータと前記磁性材料の特性とに基づいて、前記着磁器と該磁性材料とを含んだ系に対応したパラメータを算出する算出工程と、前記固有のパラメータと系に対応したパラメータとに基づいて着磁器に流れる電流波形を計算する計算工程とを備え、

前記磁性材料を有限個の要素に分割し、磁化していない

各要素に対して前記着磁電流波形計算工程により算出された電流波形により発生する磁界を印加した場合の印加磁界の過渡解析を行い、各要素ごとの最大磁界を抽出し、該最大磁界と前記磁性材料の特性とに基づいて各要素ごとに最大磁化点を算出する初磁化過程計算工程を更に備えることを特徴とした磁化分布算出方法。

【請求項19】 前記初磁化過程計算工程により算出された各要素の最大磁化点と、前記磁性材料の特性とに基づいて各要素の残留磁化を算出する残留磁化計算工程を更に備えることを特徴とする請求項18に記載の磁化分布算出方法。

【請求項20】 前記残留磁化計算工程により算出された各要素の残留磁化と、該残留磁化を有する各要素に前記着磁器より磁界が印加された場合の前記各要素の磁化を算出する減磁過程計算工程を更に備えることを特徴とする請求項19に記載の磁化分布算出方法。

【請求項21】 前記磁性材料に磁界を印加して着磁した場合の磁化の状態を示す磁化曲線のうち、高磁界を印加した場合の磁化曲線を、該磁性材料の特性に基づいて算出する完全着磁曲線推定工程をさらに備え、該磁化曲線を用いて磁化分布を算出することを特徴とする請求項18乃至20に記載の磁化分布算出方法。

【請求項22】 前記着磁器の固有のパラメータと、前記磁性材料の特性を示すパラメータとを独立に管理することを特徴とする請求項18に記載の磁化分布算出方法。

【請求項23】 前記電流波形計算工程と、前記完全着磁曲線推定工程と、前記初磁化計算工程と、前記残留磁化計算工程と、前記減磁過程計算工程とは、それぞれ独立に機能させることも、所定の工程を連動して機能させることも可能であることを特徴とする請求項21に記載の磁化分布算出方法。

【請求項24】 前記着磁電流波形計算工程により算出された電流波形を表示する工程を更に備えることを特徴とする請求項18に記載の磁化分布算出方法。

【請求項25】 前記完全着磁曲線推定工程により算出された磁化曲線を表示する工程を更に備えることを特徴とする請求項21に記載の磁化分布算出方法。

【請求項26】 前記初磁化過程計算工程により算出された各要素の最大磁化点を表示する工程を更に備えることを特徴とする請求項18に記載の磁化分布算出方法。

【請求項27】 前記残留磁化計算工程により算出された各要素の残留磁化を表示する工程を更に備えることを特徴とする請求項19に記載の磁化分布算出方法。

【請求項28】 前記減磁過程計算工程により算出された各要素の磁化を表示する工程を更に備えることを特徴とする請求項20に記載の磁化分布算出方法。

【請求項29】 前記減磁過程算出工程において各要素の磁化を算出するにあたり前記着磁器より印加される磁界のうち、前記磁性材料単体での該磁性材料近傍の磁界

分布を表示する工程を更に備えることを特徴とする請求項28に記載の磁化分布算出方法。

【請求項30】 前記減磁過程算出工程において各要素の磁化を算出するにあたり前記着磁器より印加される磁界に基づいて、前記磁性材料単体での該磁性材料表面の磁束密度を表示する工程を更に備えることを特徴とする請求項28に記載の磁化分布算出方法。

【請求項31】 前記着磁器を有限個の要素に分割した要素分割モデルを自動的に生成する生成工程を更に備えることを特徴とする請求項28乃至30に記載の磁化分布算出方法。

【請求項32】 前記生成工程は、前記磁性材料の極数及び径、前記着磁器のコイルの太さおよびスロットあたりのコイルの巻き数とに基づいて生成することを特徴とする請求項31に記載の磁化分布算出方法。

【請求項33】 前記生成工程により生成された要素分割モデルを表示する工程を更に備えることを特徴とする請求項31または32に記載の磁化分布算出方法。

【請求項34】 前記生成工程により生成された要素分割モデルを、前記磁性材料と、前記着磁器の着磁ヨークおよびコイルと、空気とに色分けして表示することを特徴とする請求項33に記載の磁化分布算出方法。

【請求項35】 請求項18～34のいずれか1つに記載の磁化分布算出方法をコンピュータによって実現させるための制御プログラムを格納した記憶媒体。

【請求項36】 請求項18～34のいずれか1つに記載の磁化分布算出方法をコンピュータによって実現させるための制御プログラム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、磁性体に磁界を印加して着磁を行う際の磁化分布を、数値計算により求める装置に関する。

【0002】

【従来技術】近年、磁気記録、電磁アクチュエータといった機器の設計のために、磁石のヒステリシス現象を数値解析によりシミュレーションする試みが数多く検討されている。このような中で特に、硬磁性材料に強磁界をかけて着磁を行う際の、磁石中の磁化分布を求める方法の1つとしてVMSW法がある。

【0003】本方法は、一軸異方性結晶粒子の磁化回転挙動を表すS-Wモデル（Stoner and Wohlfarthのモデル）の集合としてヒステリシス特性を表現する手法に基をおくものであり、各磁化を可変とするように手を加えた手法である。本手法の具体的な内容は、「毛利：異方性材料の新しい静磁界解析法と磁化ベクトル測定によるその検証、電気学会研究会資料、静止器・回転機合同研究会SA-91-6、RM-91-15、pp51-60（1991）」、及び「毛利：異方性材料の新しい静磁界解析法II、電気学会研

究会資料、静止器・回転機合同研究会SA-91-25、RM-91-88、pp97-106(1991)」に記載されており、その中で、永久磁石の着磁、減磁過程の解析が行われている。

【0004】また他に「M. Enokizono et al.: Magnetic Field Analysis of Anisotropic Permanent Magnet Problems by Finite Element Method, IEEE Trans. Magn., MAG-33, No. 2, pp1612-1615 (1997)」、「榎園、津崎：異方性永久磁石問題に関する磁界解析、電気学会研究資料マグネティックス研究会MAG-96-251、pp21-30(1996)」にもVMSW法を用いて磁石の着磁、減磁過程の計算を行った結果が報告されている。

【0005】しかしながら、上記のいずれの技術も、磁化分布をもとめるにあたり、VMSW法を用いた専用の磁界解析ソルバー(装置)を新たに開発する必要があり、その負荷は大きかった。また、入力データとして着磁電流波形が必要であり、そのためにあらかじめ測定が必要であった。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】本発明は、上記課題を解決するためになされたもので、磁石の磁化分布の算出に必要な着磁器の着磁電流波形を計算によりもとめることができ、かつ既存の汎用磁界計算ソルバーを用いて磁石の磁化分布を算出する可能な磁化分布算出処理装置を提供することを目的とする。

【0007】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するために、例えば本発明の磁化分布算出処理装置は以下の構成を備える。すなわち、着磁器によって磁性材料に磁界を印加し着磁したときの、該磁性材料における磁化分布を算出する磁化分布算出装置であって、前記着磁器に流れる電流波形を算出する着磁電流波形計算手段を備え、該着磁電流波形計算手段は、前記着磁器の固有のパラメータを設定する設定手段と、前記設定された固有のパラメータと前記磁性材料の特性とに基づいて、前記着磁器と該磁性材料とを含んだ系に対応したパラメータを算出する算出手段と、前記固有のパラメータと系に対応したパラメータとに基づいて着磁器に流れる電流波形を計算する計算手段とを備え、前記磁性材料を有限個の要素に分割し、磁化していない各要素に対して前記着磁電流波形計算手段により算出された電流波形により発生する磁界を印加した場合の印加磁界の過渡解析を行い、各要素ごとの最大磁界を抽出し、該最大磁界と前記磁性材料の特性とに基づいて各要素ごとに最大磁化点を算出する初磁化過程計算手段を更に備える。

【0008】

【発明の実施の形態】以下、添付の図面を参照して、本発明の好適な一実施形態を詳細に説明する。

【0009】

【実施形態1】図1は、本発明の一実施形態にかかる磁化分布算出装置を示すブロック図である。全体の動作を制御する中央処理装置(CPU)101に、解析結果等を表示する表示装置102、及び解析者が入力を行なう入力装置103がバス106を介して接続されている。また同様にバスを介して、着磁計算プログラムが格納され、制御動作時の各種情報が格納され且つ読み出されるメモリ104、システムに収まらないデータを、またシステムが終了した後もデータを保存する外部記憶装置105が接続されている。

【0010】磁化分布計算を行うプログラムは図1に示すように、着磁電流波形計算部、完全着磁曲線推定部、初磁化過程計算部、残留磁化計算部、減磁過程計算部の5つから構成される。また、使用するデータは図1に示すように、磁石の特性として、1)初磁化曲線、2)可逆磁化回転領域の最小磁界 H_b 、3)残留磁化 M_r 、4) χ_{rec} 、5)磁石の導電率の5つがあり、着磁器の構成等を示すデータとして、1)着磁器の分割モデル、2)着磁ヨークのBH特性及び導電率、3)コイルの巻き数、4)コイルの抵抗、5)コンデンサの容量、6)着磁電流のピーク値の6つがある。

【0011】以下に、磁石の特性及び着磁器の構成等を示すデータを用いて磁石の磁化分布計算を行う5つの計算部に対して、個々に詳細な説明を行っていく。

【0012】1. 着磁電流波形計算部

30 着磁電流波形計算部は、着磁器の構成等に関するデータに基づいて磁石を着磁する際の着磁器の電流波形(着磁電流波形)をもとめる処理手段で、以下に着磁電流波形計算部において用いる基本式と、処理の流れについて説明する。

【0013】着磁器の電源回路は、図2に示すようなLCR回路として表現され、着磁は電荷Qを有する容量Cのコンデンサを抵抗RとインダクタンスLのコイルを通じて放電させることで行われる。このときの電源回路の方程式(基本式)は、(1-1)式の通りである。

【0014】

【数式1】

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = 0 \quad (1-1)$$

本微分方程式は、Rと $2\sqrt{L/C}$ に応じて以下に示す3つの場合に分けられる。

【0015】

【数式2】

$$(a) \quad R > 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{の場合}$$

$$\begin{aligned} i &= -\frac{2Q}{\sqrt{R^2C^2 - 4LC}} e^{-\xi t} \sinh \eta t \\ &= -\frac{2Q}{\sqrt{R^2C^2 - 4LC}} \cdot \frac{e^{(\eta-\xi)t} - e^{-(\eta+\xi)t}}{2} \\ \xi &= \frac{R}{2L}, \quad \eta = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \end{aligned} \quad (1-2)$$

【0016】

【数式3】

$$(b) \quad R = 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{の場合}$$

$$\begin{aligned} i &= -\xi^2 Q t e^{-\xi t} \\ \xi &= \frac{R}{2L} \end{aligned} \quad (1-3)$$

【0017】

【数式4】

$$(c) \quad R < 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{の場合}$$

$$\begin{aligned} i &= -\frac{2Q}{\sqrt{4LC - R^2C^2}} e^{-\xi t} \sin \zeta t \\ \xi &= \frac{R}{2L}, \quad \zeta = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \end{aligned} \quad (1-4)$$

なお上式において、実際には着磁器のインダクタンスLは、着磁器の磁化飽和の程度により変化するが、ここでは一定（ユーザが指定した一定の電流を流したときの値）として扱うことにする。

【0018】図3は式（1-2）から式（1-4）の基本式を用いて、着磁電流波形を計算する手順を示したフローチャートである。以下その内容を説明する。

【0019】ステップS301では、着磁器の構成等を示すデータとして着磁器本体のデータおよび電源回路のデータをメモリに読み込む。具体的には、着磁器本体についての着磁器分割モデル、着磁ヨークのBH特性及び導電率、コイルの巻き数、着磁電流の目安（一定値）と、電源回路についてのコイルの抵抗R、コンデンサの容量C、着磁電流のピーク値Iである。

【0020】ステップS302では、ステップS301で読み込んだ着磁器本体のデータに基づいて、有限要素法により磁場計算を行い、着磁器のインダクタンスLを計算する。なお、着磁電流の目安としては、着磁ヨーク

が飽和領域に達しない程度の微弱な電流でよい。

【0021】ステップS303では、電源回路のコンデンサの両端子電圧Vの初期値を設定する。本初期値は1V程度でよい。

【0022】ステップS304では、ステップS301で読み込んだ電源回路のコンデンサの容量CおよびステップS303で設定した電源回路のコンデンサの両端子電圧Vの値とから電源回路のコンデンサの電荷量Qを求める。

【0023】ステップS305では、着磁電流波形を上式（1-2）～（1-4）により求める。

【0024】ステップS306ではステップS305で求めた着磁電流波形のピーク値をJ_{peak}として設定する。

【0025】ステップS307では、ステップS306で設定されたJ_{peak}を、ユーザが指定した着磁電流のピーク値（ステップS301で読み込んだ着磁電流のピーク値I）と比較する。十分一致すればステップS306で得られた着磁電流波形を最終結果とする（ステップS307）。

【0026】一方、ステップS308でJ_{peak}が、ユーザが指定した着磁電流のピーク値と一致しない場合には、電源回路のコンデンサ両端子電圧Vを変更して（ステップS308）、一致するまで繰り返す。

【0027】なお、ここではステップS302の着磁器のインダクタンスLの計算に有限要素法を使用した。境界要素法、積分法、差分法等他の方法を使用してもよい。

【0028】2. 完全着磁曲線推定部

完全着磁曲線推定部は、磁化分布の算出に必要な磁化曲線（磁石に磁界Hを印加して着磁した場合の磁化Mの状態を示す曲線）をもとめるもので、磁化曲線（BH曲線）の測定において、飽和磁化に達するまでの十分な磁界（高磁界）がかけられない場合に、すでに測定された磁石の磁化曲線（低磁界の磁化曲線）を外挿することによって完全着磁部分までを推定する処理手段である。

【0029】以下にその方法とその方法の妥当性を示したうえで、処理の流れについて説明する。

【0030】1) 完全着磁部分の推定方法

完全着磁部分の推定にあたっては、BH曲線が次のStoner-Wohlfarth方程式で表されるものとして行う。なおここで、 H_A は磁石の異方性磁界である。以下にその方法を説明する。

【0031】

【数式5】

$$\frac{1}{2}H_A \sin 2\phi - H \sin(\omega - \phi) = 0 \quad (2-1)$$

$$M = M_r \cos(\omega - \phi) \quad (2-2)$$

$$\omega = \cos^{-1}(R_r) \quad (2-3)$$

$$R_r = \frac{M_r}{M_s} \quad (2-4)$$

Stoner-Wohlfarth方程式を導入するにあたって、まず飽和磁化 M_s が必要である。ここでは次の2つの方法のいずれかで決定する。

【0032】a. 等方性磁石を想定し、単純に残留磁化 M_r の2倍とする。

b. 図4に示すように、初磁化曲線（(a)図）から $1/H^2$ 外挿を行う（完全着磁曲線を2次曲線で近似することにより得る（(b)図））。

【0033】ここで、図4(a)は横軸に磁界 H を、縦軸に磁化 M をとった場合の磁化曲線であり、図4(b)は横軸に $1/H^2$ を、縦軸に磁化 M をとり、図4(a)の磁化曲線に基づいて各点をプロットし、2次曲線で近似することで $1/H^2 = 0$ のときの磁化 M の値、すなわち飽和磁化 M_s をもとめるための図である。

【0034】本発明は基本的には等方性磁石に対して適用できるものであるが、僅かに異方性がある場合にも上記bの方法を適用することが可能であり、a、bの両方をユーザが選択できるようにすることで、利用の範囲を拡げている。

【0035】次に得られた飽和磁化 M_s 及び測定値の残留磁化 M_r を用いて角型比 R_r を求め（上記aを使用した場合0.5）、以下の手順で磁化曲線の測定値がない部分の磁界 H に対する磁化 M を求める。

【0036】(i) 可逆磁化回転領域（磁化曲線において、着磁時の磁化曲線と減磁時の磁化曲線のヒステリシスループが一本になった領域。すなわち図5に示す(H_b 、 M_b)以上の領域)の任意の点(H_f 、 M_f)に対して、まず次式(2-5)により任意の点(H_f 、 M_f)における磁化回転角 ϕ_f を求め、次に(2-6)式により異方性磁界 H_A を求める。

【0037】ここで、図5は、横軸に磁界 H を、縦軸に磁化 M をとった場合の磁化曲線であり、着磁時の磁化曲線と、可逆磁化回転領域以上(H_b)の磁界を印加後に減磁した場合の減磁時の磁化曲線（減磁曲線）とを重ねて記載したもので M_s は飽和磁化、 M_r は残留磁化を示す。

【0038】なお、(2-5)式は上記(2-2)式に $M=M_f$ を代入し磁化回転角 ϕ について解いたもので、

(2-6)は(2-1)式に $H=H_f$ を代入し異方性磁界 H_A について解いたものである。

【0039】また、可逆磁化回転領域の点が複数ある場合は、それらの異方性磁界 H_A の平均値を使用する（すなわち、入力データ中の磁界 H_b 以上のすべての点を使用する）。

【0040】

【数式6】

$$\phi_f = \omega - \cos^{-1}\left(\frac{M_f}{M_s}\right) \quad (2-5)$$

$$H_A = \frac{2H_f \sin(\omega - \phi_f)}{\sin 2\phi_f} \quad (2-6)$$

(ii) 上記(i)で得た異方性磁界 H_A を用いて、磁化曲線の測定値がない部分の磁界 H に対する磁化回転角 ϕ を(2-1)式によって求め（求めかたは次述）、

(2-2)式により磁化 M を求める。なお(ii)において、次式(A-1)のStoner-Wohlfarth方程式に、磁界 H 、異方性磁界 H_A が与えられたときの磁化回転角 ϕ を求める必要がある。

【0041】

【数式7】

$$\frac{1}{2}H_A \sin 2\phi - H \sin(\omega - \phi) = 0 \quad (A-1)$$

ここでは(A-1)式を(A-2)式、(A-3)式のように置き、ニュートン法を用いて、 $\phi=0$ から出発し、(A-4)式を繰り返すことにより、磁化回転角 ϕ を求める。

【0042】

【数式8】

$$f(\phi) = \frac{1}{2}H_A \sin 2\phi - H \sin(\omega - \phi) \quad (A-2)$$

$$\frac{\partial f(\phi)}{\partial \phi} = H_A \cos 2\phi + H \cos(\omega - \phi) \quad (A-3)$$

$$\phi_{n+1} = \phi_n - \frac{f(\phi_n)}{\frac{\partial f(\phi_n)}{\partial \phi}} \quad (A-4)$$

上記方法により、磁界 H に対する磁化 M が求まる。一般に磁化曲線は磁界 H が大きくなるにつれて飽和磁化 M_s に近づき、その変化の度合いは小さくなる。従って磁化曲線を有限ないくつかの点で表現する場合には、磁界 H が大きな部分ほど点の間隔を大きくした方が少数の点で表現することができる。このとき磁化 M を与えて磁界 H を求める方法では、磁化 M の与え方が難しいが（飽和磁化 M_s に近づくほど、間隔を小さくする必要がある）、本方法によれば、磁界 H を与えることから、点の間隔を容易に大きく設定できるので非常に便利であるという効

果が得られる。

【0043】2) 完全着磁部分の推定方法の妥当性
次に上記1)のStoner-Wohlfarth方程式により得られたBH曲線の外挿部分の妥当性を確認する方法を説明する。

【0044】

【数式9】

$$H_A = \frac{M_r(\sin^2 \omega)}{\chi_r} \quad (2-7)$$

$$= \frac{2M_r}{3\chi_r} \quad (\text{完全等方性磁石の場合}) \quad (2-8)$$

(2-6)式で求めた異方性磁界 H_A は、減磁曲線の M_r 点での接線の勾配を χ_r として(図6は減磁時の磁化曲線(減磁曲線)で、磁界 $H=0$ の時の磁化 M を M_r 、 M_r 点における減磁曲線の傾きを χ_r として)、次式で表すことができることがわかっている。なお本式中 $\langle \rangle$ は空間平均値を意味し、 $\langle \rangle$ の値は完全異方性磁石ではゼロ、完全等方性磁石では $2/3$ である。

【0045】また $\langle \rangle$ の値は、後述の代表粒子モデルに
対しては、次式のようにになる。

【0046】

【数式10】

$$\begin{aligned} \langle \sin^2 \omega \rangle &= \sin^2 \omega \\ &= 1 - \cos^2 \omega \\ &= 1 - R_L^2 \end{aligned} \quad (2-9)$$

そこで、上記(2-6)式で求めた異方性磁界 H_A を
(2-7)式に代入して得られる χ_r (次式(2-10))と、測定した磁化曲線の χ_r とを比較すること
で、上記で推定された磁化曲線の完全磁化部分の妥当性を確認することができる。

【0047】なお等方性磁石に対して、(2-10)式
の $\langle \rangle$ を計算するにあたっては、 $2/3$ とする方法と
(2-9)を使用する方法の2つをあげたが、両者の差は小さく、どちらを採用してもよい。

【0048】

【数式11】

$$\chi_r = \frac{M_r(\sin^2 \omega)}{H_A} \quad (2-10)$$

【0049】3) 完全着磁部分の推定処理の流れ
次に完全着磁部分の推定処理の具体的な手順を図7を用いて以下に説明する。

【0050】ステップS701では、永久磁石の特性である、初磁化曲線、可逆回転磁化領域の最小磁界

(H_b)、残留磁化 M_r をメモリに読み込む。なお、これらはいずれも測定によって得られるデータである。

【0051】ステップS702ではステップS701で読み込んだ磁化曲線を構成する各点のデータに関して、

磁化 M を求める。

【0052】ステップS703では上記aまたはbの方法により、飽和磁化 M_s を求め、ステップS704では、角型比 R_s を求める。

【0053】ステップS705では(2-3)式により、平均的な磁化回転角 ω を求める。ステップS706では(2-5)式および(2-6)式により、可逆磁化回転領域における異方性磁界 H_A を求める。

【0054】ステップS707では(2-1)式、(2-2)式により、測定点のない領域の磁界 H に対する磁化 M を求める。

【0055】ステップS708では(2-10)式より磁化曲線における残留磁化 M_r 点での減磁曲線の傾き χ_r を求める。

【0056】3. 初磁化過程計算部

初磁化過程計算部は、磁石を有限個の要素に分割し、磁化0の状態から各要素に対して着磁器より磁界 H を印加した場合の印加磁界の過渡解析を有限要素法等の一般的な磁界計算を用いて算出し、各要素ごとの最大磁界を抽出し、該最大磁界と磁石の特性とに基づいて各要素ごとの磁化(最大磁化点)を算出する処理である。以下に、有限要素法等の一般的な磁界計算を利用できる根拠を示した上で、初磁化過程計算部における処理手順を説明する。

【0057】1) 有限要素法等の一般的な磁界計算を利用できる根拠

図8のように、単位体積の磁性体片に外部磁界 H_0 が印加され、平均磁化 M が誘起されたときの系の自由エネルギー変化は次式で表される(ここでは熱的、力学的効果等は考えない)。

【0058】

【数式12】

$$U = \int_0^M H_0 \cdot dM - M \cdot H_0 \quad (3-1)$$

本式の積分項をここでは、「反磁界 H_d によるエネルギー」と「有効磁界 H_{eff} によるエネルギー」とに便宜的に分けて取り扱うことにすると、(3-2)式のように表すことができる。

【0059】

【数式13】

$$U = -\frac{1}{2} H_d \cdot M + \int_0^M H_{eff} \cdot dM - M \cdot H_0 \quad (3-2)$$

次に、(3-2)式の右辺のそれぞれの項について考える。

【0060】まず反磁界係数テンソルの主軸をa軸、b軸方向、主値をそれぞれ N_a 、 N_b ($N_b \geq N_a$)とすると、反磁界エネルギーは、重ねあわせの原理に従って、a軸方向に $M \cos(\theta - \phi)$ を持つ場合とb軸方

向に磁化 $M \sin(\theta - \phi)$ をもつ場合のエネルギーの和として次式で表すことができる。ここで各ベクトルの方向は、図8に示すとおりで斜線領域で示した単位体積の磁性体片に対して、磁化容易軸方向と磁化困難軸方向とをそれぞれ破線矢印のようにとった場合、反磁界係数テンソルの主軸のうち、a軸と磁化容易軸方向とのなす*

*角度を ϕ 、磁化 M の方向と磁化容易軸方向とのなす角度を θ 、外部磁界 H_0 と磁化容易軸方向とのなす角度を Ω とおく。また、 μ_0 は真空の透磁率である。

【0061】

【数式14】

$$-\frac{1}{2} \mathbf{H}_a \cdot \mathbf{M} = \frac{1}{2\mu_0} (N_a M_a^2 + N_b M_b^2) \\ = \frac{1}{2\mu_0} \{N_a + (N_b - N_a) \sin^2(\theta - \phi)\} M^2 \quad (3-3)$$

次に磁化エネルギーは、有効磁界 H_{eff} の磁化容易軸方向と磁化困難軸方向の成分をそれぞれ H_e 、 H_h とし、またそれぞれの方向の磁化成分 M_e 、 M_h を $M \cos \theta$ 、 $M \sin \theta$ で置き換えると、次のように表され ※

※る。

【0062】

【数式15】

$$\int_0^M \mathbf{H}_{eff} \cdot d\mathbf{M} = \int_0^{M_e} H_e dM_e + \int_0^{M_h} H_h dM_h \\ = \int_0^{M_e} \left(\frac{M_e}{\chi_e} \right) dM_e + \int_0^{M_h} \left(\frac{M_h}{\chi_h} \right) dM_h \\ = \frac{1}{2} \left(\frac{M_e^2}{\chi_e} + \frac{M_h^2}{\chi_h} \right) \\ = \frac{M^2}{2} \left(\frac{1}{\chi_e} + \beta \sin^2 \theta \right) \quad (3-4)$$

$$\beta = \frac{1}{\chi_h} - \frac{1}{\chi_e} \quad (3-5)$$

一方、外部磁界 H_0 との相互エネルギーは次の通りである。

★【0063】

【数式16】

$$-\mathbf{M} \cdot \mathbf{H}_0 = -MH_0 \cos(\Omega - \theta) \quad (3-6)$$

以上より、次の自由エネルギー U の具体式 (3-7) が得られる。

30 ☆【0064】

【数式17】

$$U = \frac{1}{2\mu_0} \{N_a + (N_b - N_a) \sin^2(\theta - \phi)\} M^2 + \frac{M^2}{2} \left(\frac{1}{\chi_e} + \beta \sin^2 \theta \right) \\ - MH_0 \cos(\Omega - \theta) \quad (3-7)$$

(3-7) 式に変分原理を適用する。すなわち $\partial U / \partial M = 0$ 、 $\partial U / \partial \theta = 0$ を求めることにより、次の方程式 (3-8) および (3-9) が導かれる。

◆【0065】

【数式18】

$$\{N_a + (N_b - N_a) \sin^2(\theta - \phi)\} \frac{M}{\mu_0} + \left(\frac{1}{\chi_e} + \beta \sin^2 \theta \right) M - H_0 \cos(\Omega - \theta) = 0 \quad (3-8)$$

$$\frac{1}{2\mu_0} (N_b - N_a) M \sin 2(\theta - \phi) + \frac{1}{2} \beta M \sin 2\theta - H_0 \sin(\Omega - \theta) = 0 \quad (3-9)$$

異方性磁性体片の磁化 M を求めるためには、本連立方程式を解けばよい。ここで、等方性材料からなる、磁性体の塊の場合について考える。このとき、磁性体内部の微小部分においては形状異方性に対して、

【0066】

【数式19】

$$N_a = N_b$$

(3-10)

としてよい。また等方性であることから、

【0067】

【数式20】

$$\beta = \frac{1}{\chi_h} - \frac{1}{\chi_e} = 0$$

(3-11)

である。これより (3-9) 式は、次のように表される。

【0068】

【数式21】

$$H_0 \sin(\Omega - \theta) = 0 \quad (3-12)$$

よって、(3-13) 式が導かれる。

【0069】

【数式22】

$$\Omega = \theta \quad (3-13)$$

(3-13) より、磁化M、外部磁界H₀、反磁界H_d、有効磁界H_{eff}はすべて方向が一致することがわかる。一方このとき、(3-8) 式は、次のようになる。

【0070】

【数式23】

$$H_0 - \frac{N_a M}{\mu_0} = \frac{M}{\chi_e} \quad (3-14)$$

ここで、反磁界H_d、有効磁界H_{eff}は(3-15)、(3-16) 式の通りであることから、(3-14) 式は、(3-17) 式のようになる。

【0071】

【数式24】

$$H_d = \frac{N_a M}{\mu_0} \quad (3-15)$$

$$H_{eff} = \frac{M}{\chi_e} \quad (3-16)$$

$$H_0 - H_d = H_{eff} \quad (3-17)$$

磁化M、外部磁界H₀、反磁界H_d、有効磁界H_{eff}はすべて方向が一致すること及び(3-17) 式から、等方性磁石の塊の場合、(3-8)、(3-9) 式における磁化Mと有効磁界H_{eff}の関係は、等方性軟磁性体の磁化現象と同じになることがわかる。

【0072】従って、等方性磁石の初磁化過程は、磁石部分を、磁石の初磁化曲線をもった軟磁性体として扱うことで、有限要素法等の一般的な磁界計算で求めることができる。

【0073】なお本初磁化過程を、着磁電流の時間変化、渦電流考慮等過渡的に計算する場合において、どの時点での磁化を採用すべきかが問題となる。そこでここでは有限要素法で磁界計算する際の各要素に対して、時間経過中における最大値を採用することにする。

【0074】また、本初磁化過程によって、各粒子の磁化のうち、所定の分布の粒子で磁化反転が起こり、その結果、粒子磁化のベクトル総和は有限値M_mになるとして今後の説明を行う。

【0075】2) 初磁化過程計算部における処理手順次に上記1) をふまえて初磁化過程計算部における具体的な処理手順を図9を用いて以下に説明する。

【0076】ステップS901では、着磁器の構成等を示すデータとして着磁器本体のデータをメモリに読み込む。具体的には着磁器本体における着磁器分割モデル、着磁ヨークのBH特性及び導電率、コイルの巻き数、着磁電流波形として着磁電流波形計算部で得た結果である。

【0077】ステップS902では磁石の特性データとして、上記完全着磁曲線推定部で得た完全着磁曲線、及び磁石の導電率をメモリに読み込む。

10 【0078】ステップS903では有限要素法等により磁界計算を行う。計算はヨーク、磁石の渦電流、飽和を考慮した非線型過渡解析となる。

【0079】ステップS904では各要素の磁束密度経時変化のピーク値を最大磁束密度点B_mとし、最大磁束密度点B_mに基づいてそれより最大磁化点M_mを求めて外部記憶装置に保存する。

【0080】4. 残留磁化計算部

残留磁化計算部は、所定の磁界を印加して磁石を着磁後に磁界を0とした場合の磁石の残留磁化をもとめる処理手段であり、上記初磁化過程計算部によりもとめた最大磁化点M_mをとる磁化曲線をもとめ、該磁化曲線に基づいて算出する。以下にその基本式と、最大磁化点M_mをとる磁化曲線をもとめる手順を示した上で、残留磁化計算部における処理の流れについて説明する。

【0081】1) 残留磁化計算部における基本式

磁石の減磁曲線の第一象限の最大磁化点(H_m、M_m)から第二象限の急降下部の寸前までの範囲は、次の単磁区粒子の一斉磁化回転モデルすなわちStoner-Wohlfarth方程式で再現できる。なお式(4-1)において、Hは外部磁界である。

【0082】

【数式25】

$$\frac{1}{2} H_A(M_m) \sin 2\phi - H \sin(\omega - \phi) = 0 \quad (4-1)$$

$$M = M_s(M_m) \cos(\omega - \phi) \quad (4-2)$$

$$\omega = \cos^{-1}(R_s(M_m)) \quad (4-3)$$

$$R_s(M_m) = \frac{M_r(M_m)}{M_s(M_m)} \quad (4-4)$$

40 ここでH_A(M_m)は上記初磁化過程計算部でもとめた最大磁化点(H_m、M_m)を通る減磁曲線における異方性磁界である。また、M_s(M_m)は図10に示す磁化曲線において、最大磁化点(H_m、M_m)をとる減磁曲線の飽和磁化であり、R_s(M_m)は該減磁曲線の角型比である。なおこれらの値は、初磁化過程における磁化反転の状態に依存するものであり、最大磁化点(H_m、M_m)によって決定されるものである。

【0083】ここで、各最大磁化点ごとの減磁曲線の角型比は、最大磁化点に依存せず、次のように一定と仮定する((2-4) 式の値と同じ)。

【0084】

【数式26】

$$R_r(M_m) = R_s = \frac{M_r}{M_s} \quad (4-5)$$

減磁曲線が、メジャーループの磁化曲線の場合（メジャーループの磁化曲線とは、可逆磁化回転領域以上の磁界以上（すなわち H_b 以上）印加した後に減磁した場合の着磁および減磁曲線をいう）を考えると、可逆回転磁化領域の最小磁化点（ H_b 、 M_b ）において、磁化回転角 ϕ_b は、（4-2）式より（4-6）式のようになり、このとき本状態での異方性磁界 H_A （ M_b ）は（4-1）式より、（4-7）式となる。

【0085】

【数式27】

$$\phi_b = \omega - \cos^{-1}\left(\frac{M_b}{M_s}\right) \quad (4-6)$$

$$H_A(M_b) = \frac{2H_b \sin(\omega - \phi_b)}{\sin 2\phi_b} \quad (= H_A(M_s)) \quad (4-7)$$

ここで、異方性磁界 H_A （ M_b ）は次式のように、最大磁化点に比例すると仮定する。

【0086】

【数式28】

$$H_A(M_m) = H_A(M_s) \times \frac{M_m}{M_s} = H_A(M_b) \times \frac{M_m}{M_s} \quad (4-8)$$

以上により、次の2）に示す手順で、任意の最大磁化点（ H_m 、 M_m ）に対して、減磁曲線を再現することができるようになった。

【0087】2）最大磁化点 M_m をとおる磁化曲線をもとめる手順

最大磁化点 M_m をとおる磁化曲線をもとめる手順を以下示す。

(i) (4-3)、(4-5) 式より磁化回転角 ω を求め、(4-6) 式より可逆磁化回転領域における磁化回転角 ϕ_b を求める。そして (4-7)、(4-8) 式により異方性磁界 H_A （ M_m ）を求める。

【0088】(ii) (4-1) 式を用いて、最大磁化点（ H_m 、 M_m ）における（ $H=H_m$ ）磁化回転角 ϕ_m を求める。これは上述の（A-1）～（A-4）式を用いて求めることができる。

【0089】(iii) (4-2) 式において、 $\phi = \phi_m$ 、 $M = M_m$ とおいて、飽和磁化 M_s （ M_m ）を求める。本値は次式（4-9）の通りである。

【0090】(iv) 任意の磁界 H に対して（4-1）式により磁化回転角 ϕ を求めた後、（4-2）式を用いて磁化 M を求める。

【0091】

【数式29】

$$M_r(M_m) = \frac{M_m}{\cos(\omega - \phi_m)} \quad (4-9)$$

本減磁曲線における $H=0$ での磁化（残留磁化 M_r （ M_m ））は、（4-2）式における $\phi=0$ の場合に相当し（←（4-1）式は、 $H=0$ のとき $\phi=0$ となる）、（4-2）式に（4-9）式を代入した次式（4-10）で求めることができる。

【0092】

【数式30】

$$\begin{aligned} M_r(M_m) &= M_s(M_m) \cos(\omega) \\ &= M_s(M_m) R_s \\ &= \frac{M_m R_s}{\cos(\omega - \phi_m)} \end{aligned} \quad (4-10)$$

【0093】3）残留磁化計算部における処理の流れ次に残留磁化計算部における具体的な手順を図11を用いて以下に説明する。ステップS1101では永久磁石の磁化曲線データである、可逆回転磁化領域の最小磁界 H_b 、残留磁化 M_r 、飽和磁化 M_s 、 χ_{rec} 及び完全着磁曲線推定部で得た完全着磁を含む磁化曲線をメモリに読み込む。

【0094】ステップS1102ではステップS1101で読み込んだ残留磁化 M_r と飽和磁化 M_s とに基づいて角型比 R_s を求める。一般には0.5に近い値となる。

【0095】ステップS1103では上記初磁化過程計算部で得た各要素の最大磁化点の値 M_m を読み込む。

【0096】ステップS1104ではステップS1103で読み込んだ最大磁化点 M_m での磁化ベクトルの方向を磁化容易軸の方向 Θ_m として計算する（本磁化容易軸の方向は後述の残留磁化過程に必要なためである）。

【0097】ステップS1105では次の手順で、各要素の異方性磁界 H_A （ M_m ）、及び残留磁化 M_r （ M_m ）を求める。

(i) (4-3) 式により、磁化回転角 ω を求める。

(ii) (4-6)、(4-7) 式により、 H_A （ M_s ）を求める。

(iii) 各要素について、次の手順で残留磁化 M_r （ M_m ）を求める。

a. ステップS1103で読み込んだ最大磁化点 M_m 値に対する H_m 値を完全着磁曲線から求める。

b. (4-8) 式により、 H_A （ M_m ）を求める。

c. (4-1) 式により、磁化回転角 ϕ_m を求める。

d. (4-10) 式により、 M_r （ M_m ）を求める。

【0098】ステップS1106では各要素の磁化容易軸方向 Θ_m 、残留磁化 M_r （ M_m ）及び異方性磁界 H_A （ M_m ）を外部記憶装置に出力する。

【0099】5. 減磁過程計算部

減磁過程計算部は、残留磁化計算部により算出された各要素の残留磁化と、該残留磁化を有する各要素に、該各

要素の磁化が発生する磁界が印加された場合の前記各要素の磁化を算出する処理手段である。以下にかかる減磁過程の磁化分布をもとめる基本式を導く過程を示したうえで、減磁過程計算部における処理手順を説明する。

【0100】1) 減磁過程の磁化分布をもとめる基本式
減磁過程の計算にあたっては、出発点を残留角 θ_r を持った残留磁化 M_r の状態にとり、磁化回転角 θ は磁化容易軸から測るものとする。そして、磁化が (M_r, θ_r) の状態 (変化前の状態) から (M, θ) の状態 *

$$U = U_{demag} + U_{mag} + U_{anisot} - \mathbf{M} \cdot \mathbf{H}_0 \quad (5-1)$$

U_{demag} はいわゆる反磁界エネルギーの変化であり、次式で表される。

【0102】

【数式32】

$$U_{demag} = \frac{N_a(M_a^2 - M_{ar}^2)}{2\mu_0} + \frac{N_b(M_b^2 - M_{br}^2)}{2\mu_0} \quad (5-2)$$

a、b は反磁界テンソルの主値 N_a 、 N_b の方向を表す ($N_a \leq N_b$)。変化後の状態における磁化 M 、 θ (磁化 M と磁化容易軸方向とのなす角度) を未知数とするため、この式に含まれる各磁化は次のようにおきかえることができる。なおここで、 ϕ は磁化容易軸方向と反磁界テンソル a 方向とのなす角 ($< 90 \text{ deg}$) であり、 M_a 、 M_b は変化後の状態における磁化の反磁界テンソルの各軸方向の成分、 M_{ar} 、 M_{br} は変化前の状態における磁化の反磁界テンソルの各軸方向の成分、 θ_r は ※

* (変化後の状態) に変化したときの自由エネルギー密度の変化を U とする。また、反磁界のない状態での磁化に要する仕事は、磁化を M_r から M まで磁化容易軸方向に沿って変化させるのに要する仕事 U_{mag} と、 M を θ_r 方向からずらす仕事 (異方性エネルギー U_{anisot}) との和で近似する。すると自由エネルギー密度の変化 U は次の4つの寄与の和であらわすことができる。

【0101】

【数式31】

※変化前の状態における磁化 M_r と磁化容易軸方向とのなす角度をそれぞれ表す (図12)。また、 μ_0 は真空の透磁率である。

【0103】

【数式33】

$$\begin{aligned} M_a &= M \cos(\theta - \phi) \\ M_b &= M \sin(\theta - \phi) \\ M_{ar} &= M_r \cos(\theta_r - \phi) \\ M_{br} &= M_r \sin(\theta_r - \phi) \end{aligned} \quad (5-3)$$

(5-3) 式により (5-2) 式は次のように表される。

【0104】

【数式34】

$$U_{demag} = \frac{N_a(M^2 - M_r^2)}{2\mu_0} + \frac{(N_b - N_a)M^2 \sin^2(\theta - \phi)}{2\mu_0} - \frac{(N_b - N_a)M_r^2 \sin^2(\theta_r - \phi)}{2\mu_0} \quad (5-4)$$

次に U_{mag} を具体的に書き表すため、磁化容易軸方向磁化曲線の主要部を直線で近似する。すなわち、

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_r + \chi_{rec} \mathbf{H}_{eff}$$

★【0105】

★【数式35】

(5-5)

この χ_{rec} は当直線の勾配であり、第2象限の屈曲部寸前の点と残留磁化 M_r の点を結ぶ直線の勾配である (図13)。かくして、 U_{mag} は次式で表される。なお、図14に本式の積分の内容を図で示したもので、 U

mag は図14の斜線部分に他ならない。

【0106】

【数式36】

$$\begin{aligned}
 U_{mag} &= \int_{M_r}^M H_{eff} dM \\
 &= \int_{M_r}^M H_{eff} \chi_{rec} dH_{eff} \\
 &= \frac{\chi_{rec}}{2} \left[H_{eff}^2 \right]_{M_r}^M \\
 &= \frac{\chi_{rec}}{2} \{ H_{eff-M}^2 - H_{eff-M_r}^2 \} \\
 &= \frac{\chi_{rec}}{2} \left\{ \left(\frac{M_r - M}{\chi_{rec}} \right)^2 - 0^2 \right\} = \frac{(M_r - M)^2}{2\chi_{rec}}
 \end{aligned} \quad (5-6)$$

異方性エネルギー U_{aniso} について、ここでは減磁曲線の急降下部前までの区間では異方性磁界は一定であると仮定して次のように表す。

$$U_{aniso} = \frac{H_A M \sin^2(\theta - \theta_r)}{2} \quad (5-7)$$

一方、外部磁界との相互エネルギーは次の通りである。

【0108】

$$- \mathbf{M} \cdot \mathbf{H}_0 = - M H_0 \cos(\Omega - \theta) \quad (5-8)$$

以上より U の具体的表現は次のようになる。

【0109】

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{N_a(M^2 - M_r^2)}{2\mu_0} + \frac{(N_b - N_a)M^2 \sin^2(\theta - \phi)}{2\mu_0} - \frac{(N_b - N_a)M_r^2 \sin^2(\theta_r - \phi)}{2\mu_0} \\
 &\quad + \frac{(M - M_r)^2}{2\chi_{rec}} \\
 &\quad + \frac{H_A M \sin^2(\theta - \theta_r)}{2} \\
 &\quad - M H_0 \cos(\Omega - \theta)
 \end{aligned} \quad (5-9)$$

この U に変分原理を適用する。すなわち $\partial U / \partial M =$

0、 $\partial U / \partial \theta = 0$ を求めることにより、 M と θ を決め

る次の連立方程式を得る。

$$\left[\frac{\{N_a + (N_b - N_a) \sin^2(\theta - \phi)\} \chi_{rec}}{\mu_0} + 1 \right] M - M_r + \chi_{rec} H_0 \cos(\Omega - \theta) - \frac{\chi_{rec} H_A \sin^2(\theta - \theta_r)}{2} \quad (5-10)$$

$$\frac{(N_b - N_a) M \sin 2(\theta - \phi)}{2\mu_0} + \frac{H_A \sin 2(\theta - \theta_r)}{2} - H_0 \sin(\Omega - \theta) = 0 \quad (5-11)$$

異方性磁石の磁化を求めるためには、本連立方程式を解けばよい。ここで、等方性材料からなる磁石を考える。このとき、磁石内部の微小部分においては形状異方性に対して、

【0111】

【数式41】

$$N_a = N_b$$

(5-12)

としてよい。また等方性であることから、

【0112】

【数式42】

$$\theta_r = 0$$

(5-13)

である。これより、(5-10)、(5-11) 式は、次のようになる。

【0113】

【数式43】

23

24

$$M = M_r + \chi_{rec} H_0 \cos(\Omega - \theta) - \frac{\chi_{rec} H_A \sin^2 \theta}{2} - \frac{N_a \chi_{rec} M}{\mu_0}$$

$$= M_r + \chi_{rec} \left\{ H_0 \cos(\Omega - \theta) - \frac{H_A \sin^2 \theta}{2} - \frac{N_a M}{\mu_0} \right\} \quad (5-14)$$

$$\frac{H_A \sin 2\theta}{2} - H_0 \sin(\Omega - \theta) = 0 \quad (5-15)$$

ここで磁石内部の微小部分における有効磁界を H_{eff} とすると、 H_{eff} は外部磁界 H_0 と反磁界 H_d の和として表され、その磁化 M に平行な方向成分を

$H_{eff\theta}$ 、垂直な方向成分を $H_{eff\perp}$ とすると、それぞれ次のように記述される。ただしここで、 $H_{0\theta}$ 、*

$$H_{eff\theta} = H_{0\theta} + H_{d\theta}$$

$$= H_0 \cos(\Omega - \theta) - \frac{N_a M}{\mu_0} \quad (5-16)$$

$$H_{eff\perp} = H_{0\perp} + H_{d\perp}$$

$$= H_0 \sin(\Omega - \theta) + 0 \quad (5-17)$$

これによって(5-14)、(5-15)式は次のように表される。

$$M = M_r + \chi_{rec} \left\{ H_{eff\theta} - \frac{H_A \sin^2 \theta}{2} \right\} \quad (5-18)$$

$$\frac{H_A \sin 2\theta}{2} - H_{eff\perp} = 0 \quad (5-19)$$

本方程式を解くことによって M 、 θ が求まる。次に基準座標軸（ここでは直交座標系の X 軸の方向を基準軸とする）に対して表現された磁界分布に対して、本方程式(5-18)、(5-19)を適用する場合について説明する。

【0116】図16に示すように磁化容易軸方向が基準軸に対して、 Θ_m だけ傾いた状態にあり、基準軸（ X 軸）から測った H_{eff} 、磁化 M の方向をそれぞれ Θ_{eff} 、 Θ としたとき、磁界 $H = (H_x, H_y)$ は次のように表現できる。つまり次式によって磁界 $H = (H_x, H_y)$ に対する、 H_{eff} と Θ_{eff} が決まる。

【0117】

【数式46】

$$H_x = H_{eff} \cdot \cos \Theta_{eff} \quad (5-20)$$

$$H_y = H_{eff} \cdot \sin \Theta_{eff} \quad (5-21)$$

$$H_{eff} = \sqrt{H_x^2 + H_y^2} \quad (5-22)$$

次に、ここで求めた H_{eff} と Θ_{eff} を用いて、磁界 $H = (H_{eff\theta}, H_{eff\perp})$ は次のように求まる。なおここで、 θ は磁化容易軸方向と磁化 M のなす角度であり、 Ω_{eff} は磁化容易軸方向と有効磁界 H_{eff} とのなす角度である。

【0118】

* $H_{d\theta}$ は外部磁界及び反磁界の磁化 M に平行な方向成分、 $H_{0\perp}$ 、 $H_{d\perp}$ は垂直な成分である。

【0114】

【数式44】

※【0115】

※【数式45】

【数式47】

$$H_{eff\theta} = H_{eff} \cdot \cos(\Omega_{eff} - \theta) \quad (5-23)$$

$$H_{eff\perp} = H_{eff} \cdot \sin(\Omega_{eff} - \theta) \quad (5-24)$$

$$\Omega_{eff} = \Theta_{eff} - \Theta_m \quad (5-25)$$

30 以上により、 X 軸方向を基準とした直交座標系で表現された磁界 H に対して、(5-20)～(5-25)式を用いて、 $H_{eff\theta}$ 、 $H_{eff\perp}$ が求まった。

【0119】そこで更に、式(5-19)を用いて磁化回転角 θ を求め、(5-18)を用いて磁化 M を求めれば、次式により磁化 $M = (M_x, M_y)$ が求まる。

【0120】

【数式48】

$$M_x = M \cdot \cos \Theta \quad (5-26)$$

$$M_y = M \cdot \sin \Theta \quad (5-27)$$

$$\Theta = \Theta_m + \theta \quad (5-28)$$

減磁後の磁化としては、磁化 M 自身が作る磁界 $H = (H_x, H_y)$ が、式(5-18)、(5-19)を満たすような、自己無撞着な磁化 M （ M と θ ）を求めればよい。

【0121】なお、等方性磁石の場合における上記本減磁過程の磁化容易軸の方向 Θ_m は、(5-13)式にあるように、初磁化過程直後における磁界の方向をとればよい。

50

【0122】上記自己無撞着な磁化M (Mとθ) を求めるために、ここでは以下のような手順で計算を行う。

(i) 残留磁化過程で求めた各要素の磁化M₀の向きを磁化容易軸の方向とし、θ_mを求める。

(ii) 磁化M₀を、これから求めようとする減磁後の磁化Mの初期値に設定する。

(iii) 各要素に対して、磁化Mと(i)で求めた磁化容易軸とのなす角度θを求める。本θは初回は0、

(x)の反復後は(viii)で求めたθの値となる。

(iv) 磁化Mを用いて、有限要素法で磁石単体での磁界計算を行う。

(v) 必要に応じて、磁界計算後の後処理を行い磁界の結果を得る。具体的には例えば磁界計算に有限要素法を用いた場合、磁束密度Bが求まるので、下式(5-29)を使用して、磁界Hに変換する(磁石部分の透磁率をμ₀+χ_{rec}とした)。

(vi) 磁界H=(H_x、H_y)から、式(5-20)～(5-22)を用いて、H_{eff}とθ_{eff}を求め *

$$H = \frac{1}{\mu_0 + \chi_{rec}} (B - M)$$

(5-29)

【0124】2) 残留磁化計算部における処理の流れ上記に基づいて残留磁化計算部では図17に示す流れで処理を行う。

【0125】ステップS1701では、残留磁化過程計算部で得た、磁化容易軸θ_mの方向、残留磁化M_r (M_m)、異方性磁界H_Aの結果をメモリに読み込む。

【0126】ステップS1702では磁化の大きさM及び方向θの初期値を設定する。大きさはM_r (M_m)、方向は磁化容易軸と一致する方向(θ=0)とする。

【0127】ステップS1703では磁化ベクトルを直交座標のx、y成分(M_x、M_y)で表す。

【0128】ステップS1704では磁化分布(M_x、M_y)を用いて、磁石単体での磁場計算を行う。有限要素法等の一般的な磁界計算ソルバーを使用する。

【0129】ステップS1705では磁界計算の結果求まる磁石の部分の磁束密度(B_x、B_y)から磁界(H_x、H_y)を求める。

【0130】ステップS1706では磁界(H_x、H_y)を元に、(5-20)～(5-22)式により、H_{eff}、θ_{eff}を求める。

【0131】ステップS1707では(5-23)～(5-25)式により、Ω_{eff}、H_{effθ}、H_{eff⊥}を求める。

【0132】ステップS1708では(5-18)式、(5-19)式を用いて、新たな磁化の大きさM及び方向θを求める。

【0133】ステップS1709では磁化の大きさM及

する。

(vii) 式(5-25)からΩ_{eff}を求め、式(5-23)、(5-24)からH_{effθ}、H_{eff⊥}を求める。

(viii) 式(5-19)からθを求め、(5-18)より磁化Mを求める。なおここで異方性磁界H_Aには、(4-8)で求めたH_A (M_m)を使用する。

(ix) 式(5-28)よりθを求め、式(5-26)、(5-27)より、新たな磁化Mを求める。

(x) (ix)で求めた新たな磁化Mを用いて、(iii)～(vii)を、自己無撞着な磁化Mが得られるまで繰り返す。なお実際には、反復により(viii)で新たなθとMを求める際に、旧θとMをそのまま更新(置換)するのではなく、変動分の0.2～0.8だけを修正する緩和係数を導入することで収束性が向上する。

【0123】

【数式49】

び方向θが十分収束したか否かを判定し、収束が不十分の場合には、ステップS1703に戻り、ステップS1703からステップS1708までの処理を繰り返す。一方、ステップS1709で磁化M及び方向θが十分収束したと判定された場合には、ステップS1710に進み、磁化M及び方向θから、(5-26)、(5-27)式より磁化ベクトルを求め磁化分布の結果として、外部記憶装置に出力する。

【0134】なおここでは、減磁過程を計算する際に、減磁曲線の第2象限の屈曲部寸前の点と残留磁化M_rの点を結ぶ直線の勾配χ_{rec}を使用した。一般に本勾配は完全磁化曲線推定部で得られるχ_r((2-10)式)とほぼ同じ値をもつものであり、χ_rで代用してもよい。

【0135】また(5-20)～(5-28)式では、計算をxy平面の2次元に限定して説明を行ってきたが、容易にわかるように、これを3次元の式に拡張して、上記S1704のステップでは3次元の磁界計算ソルバーを用いることで、3次元の磁化分布を求めることも容易である。従って上記計算手順中で使用した(5-20)～(5-28)式は、表記のような2次元に限定されるものではなく、3次元に拡張した式も含むものである。

【0136】上記着磁電流波形計算部、完全着磁曲線推定部、初磁化過程計算部、残留磁化計算部、減磁過程計算部を持つ着磁計算装置を用いて、円筒形状をした永久磁石の着磁計算を行った例を示す。

【0137】図18は着磁器の分割モデルの一例で、1801はコイル、1802は磁石である。本着磁器にコンデンサを接続して電流を流したときの電流波形の着磁電流波形計算部による計算結果を図19に示す。ピーク電流（J_{peak}）を10kAとしており、本電流波形が実測値に近いものとなっていることを確認している。

【0138】また、測定によって得られた初磁化曲線を元に、完全飽和磁化曲線を作成した結果を図2.0に示す。横軸に磁界H、縦軸に磁化Mをとり、2001に示す磁界領域については測定結果を、2002に示す磁界領域については完全着磁曲線推定部により算出された結果をプロットしており、妥当な完全飽和磁化曲線が得られている様子がわかる。

【0139】図21の（a）は初磁化過程計算部による初磁化過程計算後、（b）は残留磁化計算部による残留磁化計算後、（c）は減磁過程計算部による減磁過程計算後の磁石内の磁化分布を矢印で表示した図を示す。また図21（d）は減磁過程計算部における減磁過程計算で得られた磁化分布の結果を用いて磁石単体での磁束の様子を図にしたものである。

【0140】このように、各計算部の結果を結果を図にして表示することで、着磁計算過程を非常に分かり易く知ることができる。

【0141】図22は磁石単体での磁石表面の磁束密度分布を実験結果と比較したものである。実測値に対して極めてよく一致する計算結果が得られていることがわかる。以上述べてきた本着磁計算方法に対して、計算を行うのに必要なデータをまとめると図23の通りである。ここにあげたデータは比較的容易に測定、調査または決定できるものばかりである。

【0142】

$$H_A(M_m) = H_A(M_s) \times \frac{M_s(M_m)}{M_s} = H_A(M_s) \times \frac{M_s(M_m)}{M_s} \quad (4-8)^*$$

そして、本仮定を用いた減磁曲線は、次の手順で求めることができる。

（i）（4-3）、（4-5）式より磁化回転角 ω を求め、（4-6）式より可逆磁化回転領域における磁化回転角 ϕ_b を求める。

（i i）飽和磁化 M_s （ M_m ）を適当な値（ M_s 程度）に設定する。

（i i i）（4-7）、（4-8）'式により異方性磁界 H_A （ M_m ）を求める。

（i v）（4-1）式を用いて、最大磁化点（ H_m 、 M_m ）における（ $H=H_m$ ）磁化回転角 ϕ_m を求める。これは上記（A-1）～（A-4）式を用いて求めることができる。

（v）（4-2）式において、 $\phi = \phi_m$ 、 $M=M_m$ とにおいて、飽和磁化 M_s （ M_m ）を求める。本値は式（4-9）の通りである。

（v i）求めた飽和磁化 M_s （ M_m ）を用いて（i i

*【実施形態2】上記実施形態1の着磁電流波形計算部では、LCR回路のうち、着磁器のインダクタンスL、コンデンサの容量C、コイルの抵抗Rをユーザが指定し、コンデンサ両端子間の電圧をプログラム内部で調整することにより、ユーザの指定した着磁電流波形のピーク値を求めた。

【0143】しかし、これは電源回路中のコンデンサ両端子間の電圧をユーザが指定し、コイルの抵抗（電源回路全体からみたときのコイルの抵抗）をプログラム内部で調整することにより、ユーザの指定した着磁電流波形のピーク値を求めてもよい。なお本方法を実現するに当たっての着磁電流波形計算部における処理の流れを計算の流れを図24に示す。図3との違いは、ステップS2403においてコイルの抵抗（R）の初期値を設定し、ステップS2408においてコイルの抵抗Rを更新するように変更する点である。これによって、着磁計算を行うのに必要なデータは図25に示す通りで、着磁器のコイル抵抗ではなく、着磁器のコンデンサ両端子間の電圧を読み込む。

【0144】本例のようにすることで、着磁回路中のコイルの抵抗が不明な場合にも簡単に計算を行うことが可能になる。

【0145】

【実施形態3】上記実施形態1では、（4-8）式に示したように、異方性磁界を最大磁化点に比例すると仮定した。本仮定は次式（4-8）'に示すように、異方性磁界を最大磁化点を通る減磁曲線の飽和磁束密度 M_s （ M_m ）に比例するとした方がより正確である。

【0146】

【数式50】

i）～（v）の計算を再び行う。本処理を飽和磁化 M_s （ M_m ）が十分収束するまで繰り返す。

（v i i）求めた異方性磁界 H_A （ M_m ）、飽和磁化 M_s （ M_m ）を用いて、任意の磁界Hに対して（4-1）式により磁化回転角 ϕ を求めた後、（4-2）式を用いて磁化Mを求める。

【0147】また、（i i i）～（v）の収束解として得られた ϕ_m を用いて、（4-10）式により残留磁化 M_r （ M_m ）を求めることができる。

【0148】

【実施形態4】上記実施形態1乃至3では、着磁計算を行う方法及び手順等について、着磁計算装置を構成する着磁電流波形計算部、完全着磁曲線推定部、初磁化過程計算部、残留磁化計算部、減磁過程計算部の5つの部分について説明を行ってきた。

【0149】本実施形態では、これらの構成部分を実際に組み込んだモジュール、及び装置全体の構成について

説明する。

【0150】図26は装置を構成するモジュール、入力データファイル、結果データファイル及び着磁計算の流れを説明する図である。図中符号がPから始まるものは実効形式のプログラムモジュールを示し、Qから始まるものはユーザが用意すべき入力データ、Rから始まるものはプログラムが吐き出すファイルである。

【0151】P02は上述の着磁電流波形計算部を組み込んだ着磁電流波形計算モジュールであり、P03は完全着磁曲線推定部を組み込んだ完全着磁曲線推定モジュールであり、P04は初磁化過程計算モジュールを組み込んだ初磁化過程計算モジュールであり、P05は残留磁化計算モジュールと減磁過程計算モジュールを組み込んだ残留磁化・減磁過程計算モジュールである。またここでは新たにP01に示す着磁分割モデル自動生成モジュールを付加している。本モジュールは着磁磁石の極数、直径、着磁器のコイルの太さ、スロット当たりのコイルの巻き数を入力データとして、それにあった形状の分割モデルを内部で自動的に生成するものである。モータ等に使用する磁石としては一般的に円筒形をしたものが多く、このようにあらかじめ決まった形状の磁石を着磁する場合に、それにあった着磁器の分割モデルを生成するものである。

【0152】Q01は着磁器の形状を表すデータファイルであり、Q02は着磁器の電源回路のデータファイルであり、Q03は磁石の初磁化曲線を表す点列（磁界と磁化の組み合わせ、または磁界と磁束密度の組み合わせ）のデータである。Q04は磁石のメジャーロープの形状を表すデータである。Q03とQ04は磁石の磁気特性をBHカーブトレーサ等で測定して得られるものである。

【0153】Q02の着磁器の電源回路データの具体的な内容の一例を図28(a)に示す。着磁電流の目安値2801、コイルの巻き数2802、着磁電流のピーク値2803、コンデンサの容量2804、コンデンサ充電時の両端子電圧2805のデータが入っている。

【0154】Q03の磁石の初磁化曲線を表す点列のデータの例を図28(b)に示す。点列データとして、磁界Hと磁束密度Bの組が10個設定されている。

【0155】Q04の磁石のメジャーロープの形状を表すデータの例を図28(c)に示す。可逆磁化回転領域の最小磁界 H_b (2806)、残留磁化 M_r (2807)、及び $x_{r.c.}$ (2808)が入っている。

【0156】なおここでは、着磁ヨークの磁気特性と導電率及び磁石の導電率はプログラムモジュールP02～P05の中に内蔵されているものとする。

【0157】このようにデータを磁石の特性データと着磁器の特性データとで分けて管理することで、管理が行い易く、使い易いシステムとなる。

【0158】次にこれらの入力データ及びプログラムモ

ジュールを用いて実際に着磁計算を行う際の手順及びデータの流れについて説明する。

【0159】ユーザはまず着磁器分割モデル自動生成モジュールP01を起動する。すると本モジュールはデータQ01をファイルから読み込み、その内容に従って着磁器の分割モデルのファイルR01を出力する。図27(a)に生成した分割モデルの一例を示す。

【0160】図27(b)は分割モデル中での材料分布を分かり易くするために表示した図である。なお、実際に分割モデルを表示する際には、材料ごとに異なる色で表示すると分かり易く、特に本着磁計算においては、永久磁石2701、着磁ヨーク2702、空気2703、+コイル2704及び-コイル2705で色を変えて表示するとよい。

【0161】ユーザは次に着磁電流波形計算モジュールP02を起動する。本モジュールは着磁器の電源回路データQ02をファイルから読み込み、計算された着磁電流波形を初磁化過程計算モジュールの入力フォーマットに沿って初磁化計算用入力ファイルの雛形R02として出力する。

【0162】次にユーザは完全着磁曲線推定モジュールP03を起動する。本モジュールは磁石の初磁化曲線データファイルQ03、磁石のメジャーロープデータファイルQ04、及び初磁化計算用入力ファイルの雛形R02を読み込み、ファイルR02の内容に、ここで求めた完全着磁曲線を付加して、初磁化計算用入力データR03として出力する。

【0163】次にユーザは初磁化過程計算モジュールP04を起動する。本モジュールは着磁電流波形データと完全着磁曲線のはいった初磁化計算用入力データR03と磁石のメジャーロープデータファイルQ04、及び着磁器の分割モデルファイルR01を読み込んだ後、内蔵する初磁化過程計算部により、初磁化を計算し、初磁化ファイルR04を出力する。なお初磁化ファイルR04には分割モデルデータも含まれている。

【0164】最後にユーザは残留磁化・減磁過程計算モジュールを起動する。本モジュールは初磁化ファイルR04を読み込み、内蔵された残留磁化計算部、減磁過程計算部により、残留磁化と減磁過程を経た磁化分布を計算し、夫々ファイルR05とファイル06に出力する。

【0165】残留磁化計算部と減磁過程計算部が同一のモジュール内にあることで、両者間で引き渡されるべきデータである磁化容易軸の方向 Θ_m 、残留磁化 M_r (M_m)、異方性磁界 H_A (M_m)は、ファイルを介してではなく、モジュール内部で引き渡される。

【0166】ここには表示していないが、ファイルR02を用いて図20に示すような経過時間×電流値の着磁電流波形をグラフ表示するモジュール、ファイルR03を用いて完全着磁曲線を図20に示すような磁界×磁化の磁化曲線をグラフ表示するモジュール、ファイルR0

4、R05、R06の磁化分布の様子をそれぞれベクトル表示するモジュールを用意しておく。

【0167】このように図化モジュールを用意しておくことで、着磁計算過程を非常に分かり易く追跡することが可能となる。なおこれらの図化モジュールの機能は、上記5つの計算モジュール機能の一部として、中に含めてもよい。

【0168】本実施形態で説明したように、着磁計算過程に沿って着磁計算を行うモジュールをいくつかに分割しておき、それぞれを独立なプログラムとすることによって、一部のデータだけを変更して計算する際の重複計算の無駄が削除できるとともに、計算過程を逐一追跡しながらの着磁計算が可能となる。

【0169】

【他の実施形態】また、本発明の目的は、前述した実施形態の機能を実現するソフトウェアのプログラムコードを記録した記憶媒体を、システムあるいは装置に供給し、そのシステムあるいは装置のコンピュータ（またはCPUやMPU）が記憶媒体に格納されたプログラムコードを読み出し実行することによっても、達成されることは言うまでもない。

【0170】この場合、記憶媒体から読出されたプログラムコード自体が前述した実施形態の機能を実現することになり、そのプログラムコードを記憶した記憶媒体は本発明を構成することになる。

【0171】プログラムコードを供給するための記憶媒体としては、例えば、フロッピディスク、ハードディスク、光ディスク、光磁気ディスク、CD-ROM、CD-R、磁気テープ、不揮発性のメモリカード、ROMなどを用いることができる。

【0172】また、コンピュータが読出したプログラムコードを実行することにより、前述した実施形態の機能が実現されるだけでなく、そのプログラムコードの指示に基づき、コンピュータ上で稼働しているOS（オペレーティングシステム）などが実際の処理の一部または全部を行い、その処理によって前述した実施形態の機能が実現される場合も含まれることは言うまでもない。

【0173】さらに、記憶媒体から読出されたプログラムコードが、コンピュータに挿入された機能拡張ボードやコンピュータに接続された機能拡張ユニットに備わるメモリに書込まれた後、そのプログラムコードの指示に基づき、その機能拡張ボードや機能拡張ユニットに備わるCPUなどが実際の処理の一部または全部を行い、その処理によって前述した実施形態の機能が実現される場合も含まれることは言うまでもない。

【0174】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば磁石の磁化分布の算出に必要な着磁器の着磁電流波形を計算によりもとめることができ、かつ既存の汎用磁界計算ソルバーを用いて磁石の磁化分布を算出する可能とな

る。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施形態1にかかる磁化分布算出装置の構成を示すブロック図である。

【図2】本発明の実施形態1にかかる磁化分布算出装置の着磁電流波形計算部で解く回路図である。

【図3】本発明の実施形態1にかかる磁化分布算出装置の着磁電流波形計算部の行う処理フローを示す図である。

10 【図4】本発明の実施形態1にかかる磁化分布算出装置の着磁電流波形計算部において $1/H^2$ 外挿により飽和磁化を求める方法を説明する図である。

【図5】磁化曲線の可逆磁化回転領域を説明する図である。

【図6】 χ_r を説明する図である。

【図7】本発明の実施形態1にかかる磁化分布算出装置の完全磁化曲線推定部の行う処理フローを示す図である。

20 【図8】本発明の実施形態1にかかる磁化分布算出装置の初磁化過程計算部の内容を説明する磁化回転モデルの説明図である。

【図9】本発明の実施形態1にかかる磁化分布算出装置の初磁化過程計算部の行う処理フローを示す図である。

【図10】本発明の実施形態1にかかる磁化分布算出装置の残留磁化の計算方法を説明する図である。

【図11】本発明の実施形態1にかかる磁化分布算出装置の残留磁化計算部の行う処理フローを示す図である。

【図12】異方性磁石の減磁過程を説明する図である。

【図13】 χ_{rec} を説明する図である。

30 【図14】 H_{eff} の積分の計算を説明する図である。

【図15】等方性磁石の減磁過程を説明する図である。

【図16】減磁過程の磁化の回転を基準軸から測った角度で説明する図である。

【図17】本発明の実施形態1にかかる磁化分布算出装置の減磁過程計算部の行う処理フローを示す図である。

【図18】本発明の実施形態1にかかる着磁器分割モデルの一例を示す図である。

【図19】本発明の実施形態1にかかる磁化分布算出装置の電流波形の計算結果の一例を示す図である。

40 【図20】本発明の実施形態1にかかる磁化分布算出装置の完全飽和磁化曲線推定部の結果の一例を示す図である。

【図21】本発明の実施形態1にかかる磁化分布算出装置の初磁化過程計算部、残留磁化計算部、減磁過程計算部の結果の一例を示す図である。

【図22】本発明の実施形態1にかかる磁化分布算出装置により得られた磁石の磁化分布を用いて磁石単体での表面磁束密度分布を求めた結果の一例を示す図である。

50 【図23】本発明の実施形態1にかかる磁化分布算出装置が必要とする入力データの一覧を示す図である。

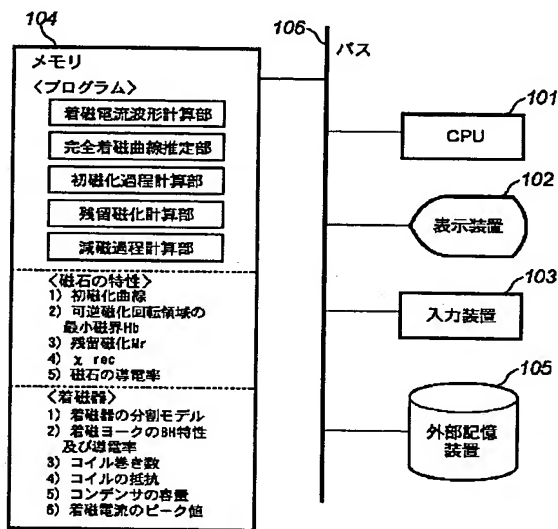
【図24】本発明の実施形態2にかかる磁化分布算出装置の着磁電流波形計算部が行う処理フローを示す図である。

【図25】本発明の実施形態2の磁化分布算出装置の着磁電流計算手段が必要とする入力データの一覧を示す図である。

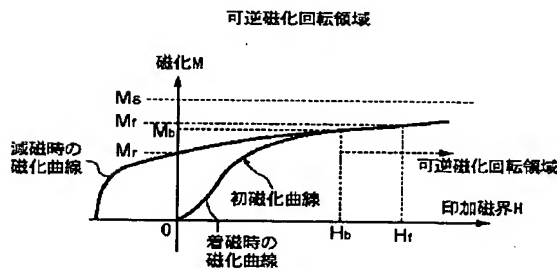
【図26】本発明の実施形態4にかかる磁化分布算出装置の構成する主要モジュールとデータの流れの一例を示す図である。

【図27】本発明の実施形態4にかかる磁化分布算出装置の着磁器の分割モデルの一例を示す図である。

【図1】



【図5】

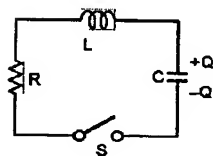


【図28】本発明の実施形態4にかかる磁化分布算出装置の着磁計算を行う入力データファイルの一例を示す図である。

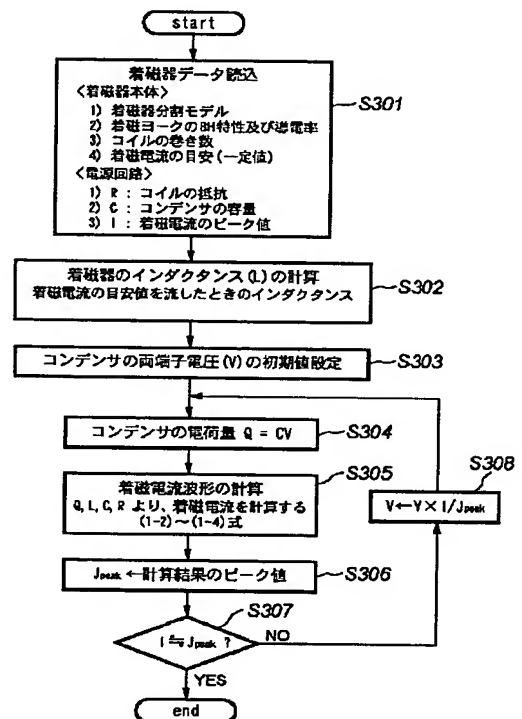
【符号の説明】

- | | |
|-----|--------|
| 101 | CPU |
| 102 | 表示装置 |
| 103 | 入力装置 |
| 104 | 外部記憶装置 |
| 105 | メモリ |
| 106 | バス |

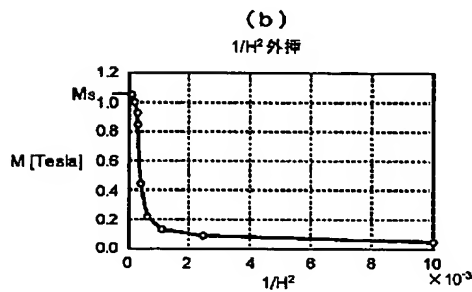
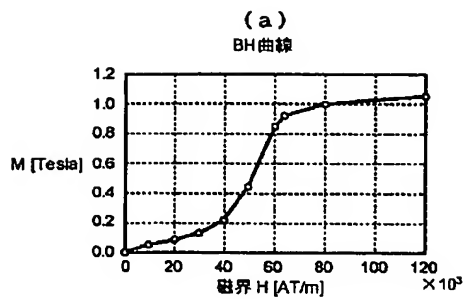
【図2】



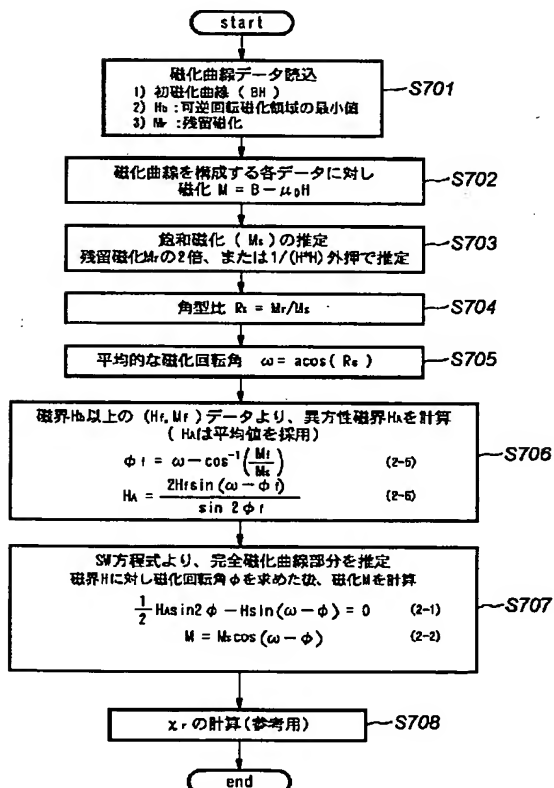
【図3】



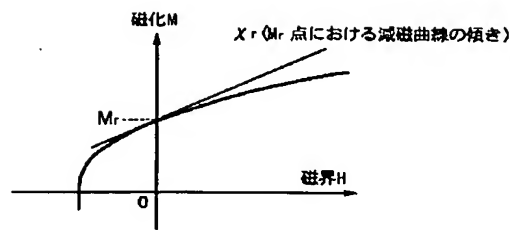
【図4】



【図7】

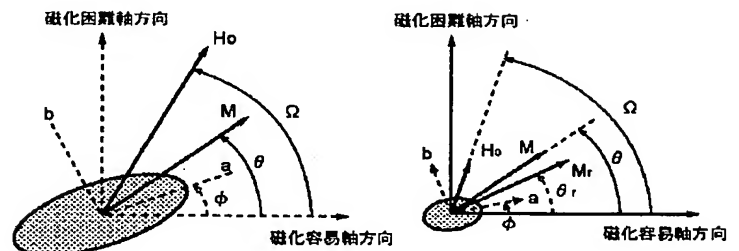


【図6】

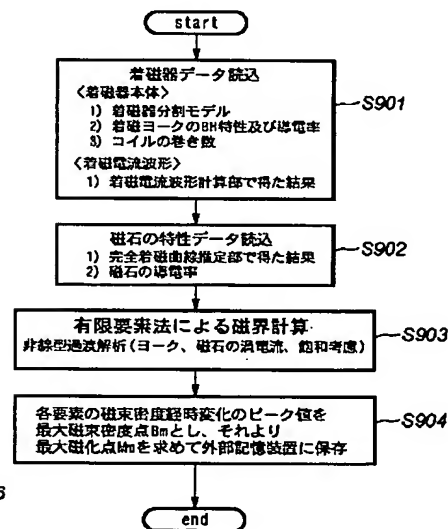


【図8】

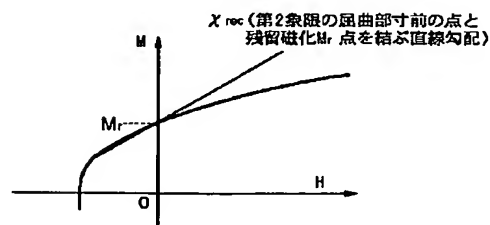
【図12】



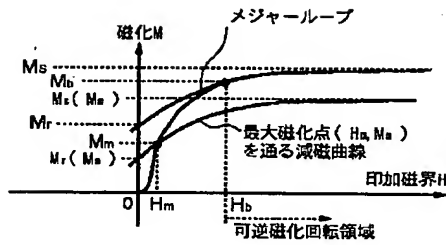
【図9】



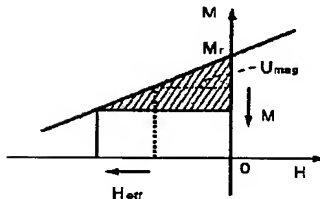
【図13】



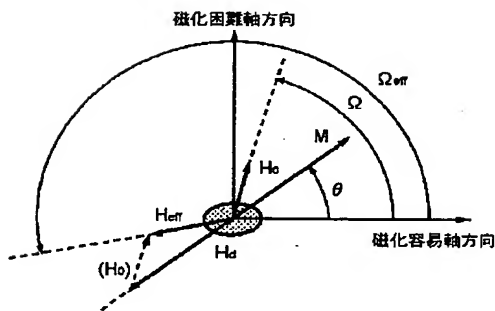
【図10】



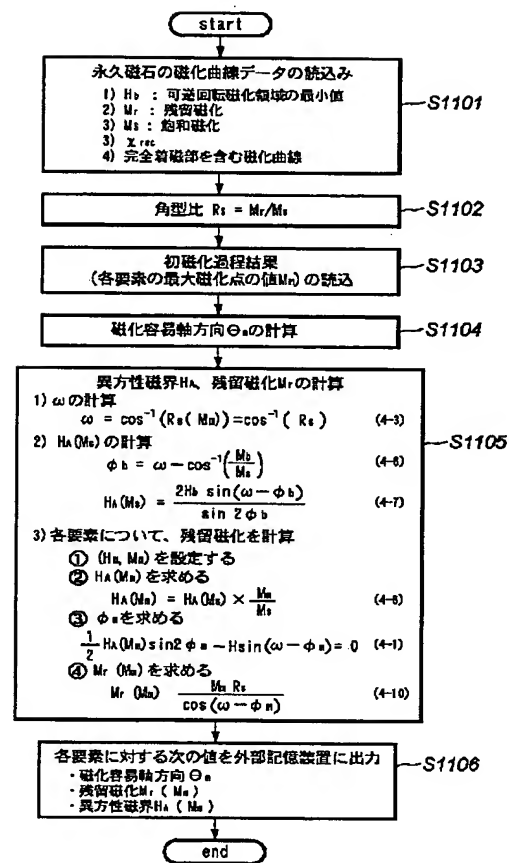
【図14】



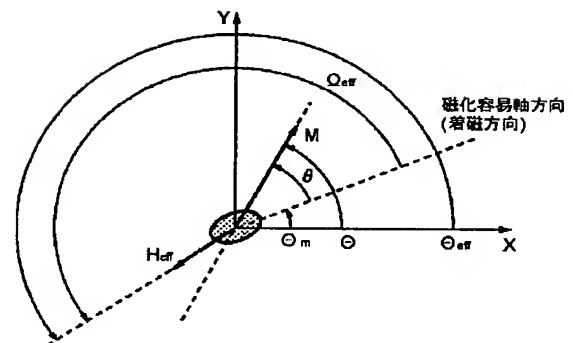
【図15】



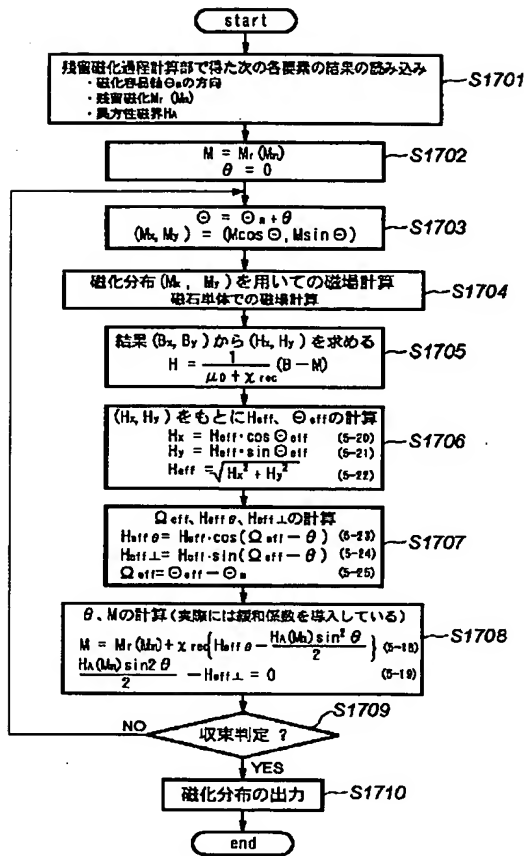
【図11】



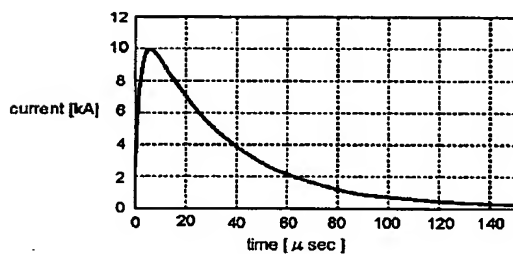
【図16】



【図 17】



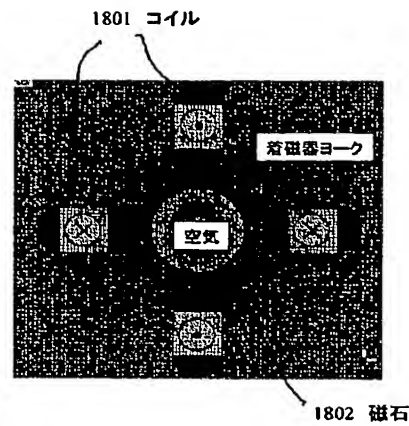
【図 19】



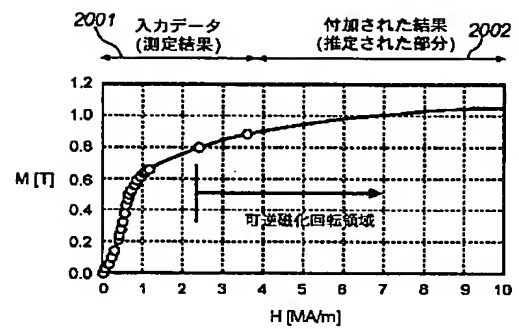
【図 23】

永久磁石	1) 初磁化曲線 2) 可逆磁化回転領域の最小磁界 H_k 3) 残留磁化 M 4) χ_{rec} 5) 磁石の導電率
着磁器	1) 着磁器の分割モデル 2) 着磁ヨークのBH特性及び導電率 3) コイル巻き数 4) コイルの抵抗 5) コンデンサの容量 6) 着磁電流のピーク値

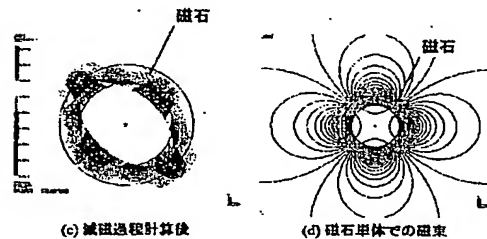
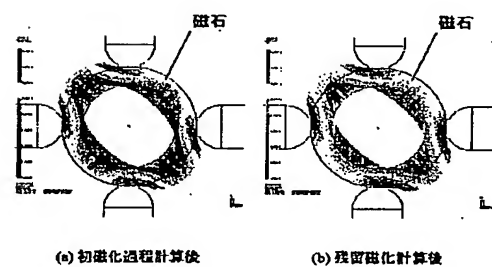
【図 18】



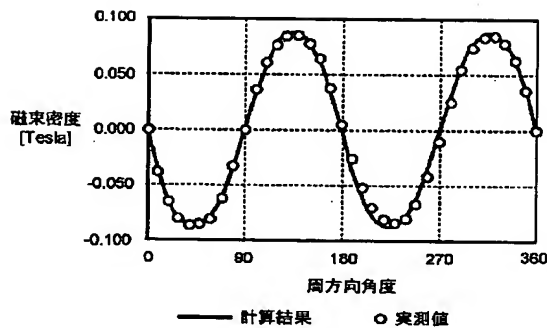
【図 20】



【図 21】



【図 22】

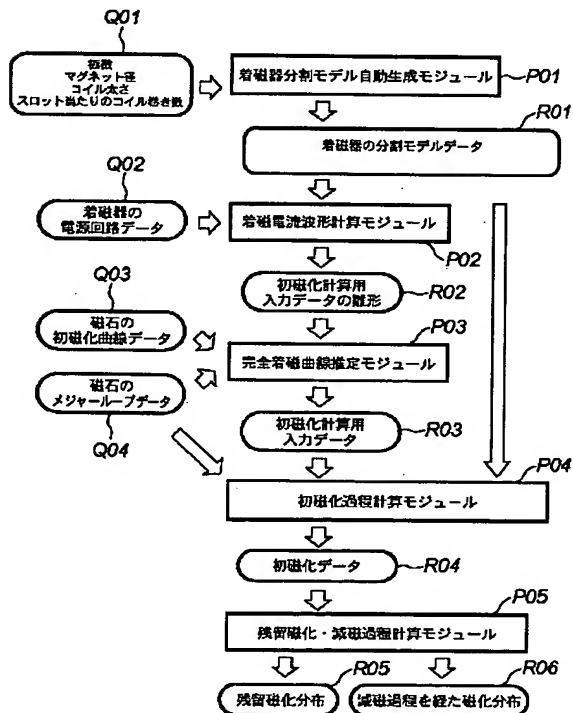


【図 25】

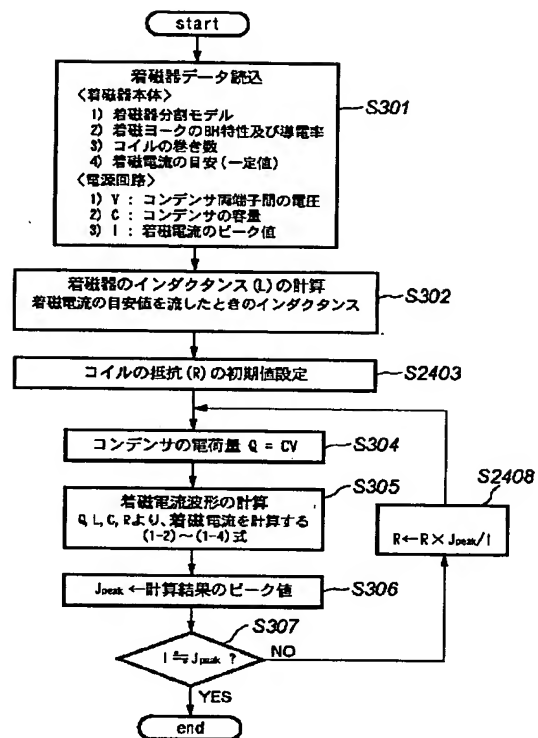
着磁計算を行うに必要なデータ一覧

永久磁石	1) 初磁化曲線 2) 可逆磁化回転領域の最小磁界 H_b 3) 残留磁化 M_r 4) X_{rec} 5) 磁石の導電率
着磁器	1) 着磁器の分割モデル 2) 着磁ヨークのBH特性及び導電率 3) コイル巻き数 4) コンデンサ両端子間の電圧 5) コンデンサの容量 6) 着磁電流のピーク値

【図 26】

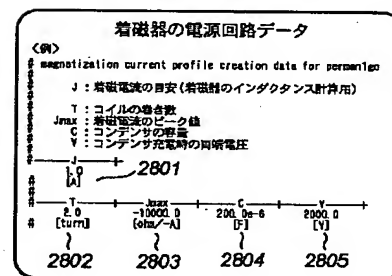


【図 24】

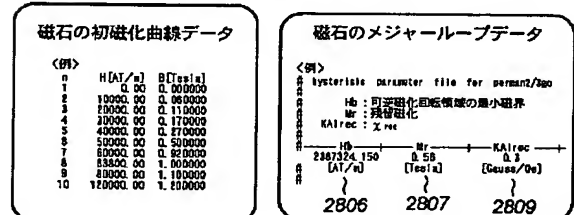


【図 28】

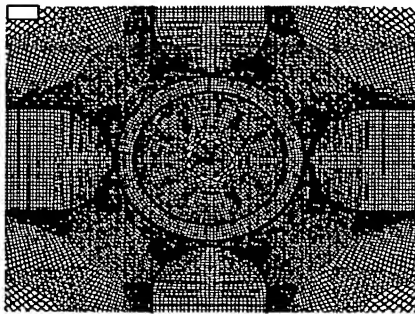
(a) 着磁器の電源回路データ



(b) 磁石の初磁化曲線データ (c) 磁石のメジャー・ループデータ

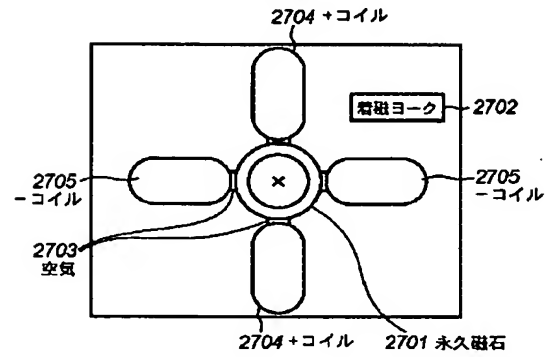


【図 27】



(a) 磁石部分の要素分割

(b) 差磁器



Best Available Copy

THIS PAGE BLANK (USPTO)